le Scienze

Gennaio 2020
euro 4,90

edizione italiana di Scientific American

Paleontologia
I segreti degli pterosauri, dominatori alati del Mesozoico

Agricoltura
Migliorare la fotosintesi per coltivazioni più produttive

Salute
La trappola dell'obesità nei cibi ultraprocessati

Una selezione di dieci innovazioni che nel prossimo futuro promettono di rivoluzionare i nostri stili di vita e il nostro impatto sul pianeta (*Illustrazione di Vanessa Bianchi*)

Gennaio 2020 numero 617

VCG/Stringer/Getty Images

10

17

91

SCIENZA NEWS

Ann Johansson/Getty Images (*processione*); Detlev Van Ravenswaay/SPL/AGF (*buco nero*); OcsanaDen/iStock (*mirto*)

di Marco Cattaneo

Editoriale

Universi paralleli

C'è ancora chi si ostina a negare l'emergenza climatica e chi invece cerca soluzioni e corre ai ripari

All'inizio di dicembre la World Meteorological Organization annunciava che la temperatura globale sta aumentando più rapidamente del previsto. E considerando il nuovo record di concentrazione di CO_2 in atmosfera stabilito nel 2018 – con 407,8 parti per milione – stimava che di questo passo alla fine del secolo la temperatura sarà da 3 a 5 gradi più alta rispetto all'era preindustriale. Negli ultimi mesi, d'altra parte, c'è stato un boom di pubblicazioni sugli effetti già in corso del riscaldamento globale, dalle alterazioni degli ecosistemi alle estinzioni di massa, dalla perdita di suoli agricoli alla vulnerabilità delle città costiere.

Eppure la Conferenza sul clima svoltasi a Madrid, la Cop25, è stata un fiasco totale. Come se i rappresentanti dei circa 200 paesi raccolti nella capitale spagnola vivessero in un universo parallelo. O meglio, c'è chi ha dichiarato da tempo l'emergenza climatica, come Irlanda, Canada, Francia e Spagna, oltre a centinaia di amministrazioni locali. C'è l'Unione Europea che nelle intenzioni della presidentessa della commissione Ursula von der Leyen vuole lanciare uno European Green Deal.

Quattro responsabili

E c'è chi si ostina a negare l'evidenza. Se la Cop25 è fallita lo si deve precisamente a quattro paesi: l'Australia, che pure in questi anni sta sperimentando ondate di calore e sta rapidamente perdendo enormi tratti della più grande barriera corallina del globo ma resta tra i primi paesi per emissioni pro capite; gli Stati Uniti di Donald Trump, che da tre anni sta ostacolando persino la diffusione delle informazioni sul cambiamento climatico da parte delle agenzie scientifiche; il Brasile di Jair Bolsonaro, che rivendica la libertà di deforestazione negando persino che sia in corso un cambiamento climatico; e l'Arabia Saudita, la sola che abbia fondate ragioni per opporsi, visti i suoi interessi petroliferi.

E poi c'è quell'altro universo, quello del mondo reale. Quello che, lungi dal negare una tendenza ormai dimostrata da migliaia di studi, comincia a cercare soluzioni e a correre ai ripari. Ne abbiamo parlato spesso, negli ultimi mesi. Per esempio nell'articolo *Oltre gli argini*, di agosto 2019, in cui si raccontava come in North Carolina, negli stessi Stati Uniti di Trump, si stia intervenendo sulle aree umide costiere per limitare i danni dell'innalzamento del livello dei mari.

Soluzioni per un futuro sostenibile

E qua e là ne parliamo anche in questo numero. Tra le dieci tecnologie da tenere d'occhio nei prossimi anni, per esempio, almeno due hanno a che vedere con possibili soluzioni in vista della riduzione del consumo di combustibili fossili. Da una parte i progetti di reattori nucleari innovativi e combustibili più sicuri potrebbero rilanciare il nucleare da fissione; dall'altra lo sviluppo di nuovi e più economici sistemi di stoccaggio dell'energia da fonti rinnovabili potrebbe finalmente ovviare almeno in parte al problema dell'intermittenza di erogazione. Ma se ne parla, magari meno direttamente, anche nell'articolo di Renato Bruni *Fotosintesi da corsa*, a p. 46, dove si discutono le strategie per rendere più efficiente il processo in modo da ridurre il nostro impatto ambientale, e in *Ripristinare la biodiversità del riso*, di Debal Deb, a p. 66, dove si parla di recuperare alla produzione varietà resistenti alle inondazioni, alla siccità e ad altre calamità.

Ci sono due universi paralleli. Uno saldamente ancorato alla realtà, in cui la scienza cerca soluzioni per un futuro sostenibile. E uno immaginario, dove si negano montagne di prove per conservare privilegi e ostacolare ogni innovazione. Ora avete tutti gli strumenti per scegliere da che parte stare.

In edicola

A richiesta con «Le Scienze» di febbraio, *Il futuro che verrà*, un libro sugli scenari ambientali e tecnologici del nostro prossimo futuro

Il domani che ci aspetta

Difficile essere ottimisti dopo la conclusione dell'ultima conferenza sul clima. Il nulla di fatto che ha caratterizzato l'incontro intergovernativo tenutosi a Madrid lo scorso dicembre implica che l'umanità è ancora su una traiettoria di emissioni di gas serra assai pericolosa per la stabilità del mondo come lo conosciamo oggi.

Di fatto, ancora una volta, i leader politici hanno deciso di ignorare quello che gli scienziati affermano e prevedono ormai da tempo. Il riscaldamento globale sarà sempre più accentuato se le emissioni dei gas responsabili di questo effetto non saranno drasticamente tagliate. Tra l'altro, dicono sempre gli scienziati, tutto questo sta avvenendo in un mondo sempre più affollato, in cui la popolazione mondiale crescerà senza sosta passando dai 7,8 miliardi circa attuali ai 10,8 miliardi del 2100, secondo le proiezioni delle Nazioni Unite. E non è l'unico scenario che dovremo affrontare in un futuro non affatto lontano.

Gli scienziati, e in verità non solo loro, si chiedono: come sarà possibile sfamare una popolazione sempre più numerosa? Saremo in grado di affrontare i rischi e gli sconvolgimenti di un pianeta sempre più caldo? Riusciremo a non portare fino in fondo l'estinzione di massa nei confronti della altre forme di vita che già oggi stiamo provocando a causa delle nostre attività? Più in generale, quali tecnologie e soluzioni escogitate dalla scienza potrebbero permetterci di affrontare indenni, o almeno di schivare l'Apocalisse, nel prossimo futuro?

In questo esercizio impegnativo si sono cimentati anche ricercatori e giornalisti scientifici in *Il futuro che verrà*, un libro curato da Jim Al-Khalili, fisico teorico britannico e noto divulgatore, in edicola a richiesta con il numero di febbraio di «Le Scienze». Dal clima all'intelligenza artificiale, dal futuro della medicina ai materiali intelligenti al futuro del cyberspazio, i vari capitoli cercano di fornire un quadro quanto più onesto e oggettivo possibile su come sarà il futuro che ci aspetta, grazie ai contributi di esperti di alto profilo nei rispettivi campi.

Provando anche a immaginare un futuro un po' più lontano fatto di viaggi interstellari e colonizzazione di altri mondi. Nel caso fosse necessaria una via di fuga dalla Terra.

QUADERNI

Tutta la scienza in formato digitale

Proseguono le uscite di *I quaderni de Le Scienze*, una collana esclusivamente digitale, composta di numeri monografici che raccolgono alcuni dei migliori articoli, italiani e internazionali, pubblicati nell'edizione cartacea e in quella on line della rivista su un tema di attualità scientifica. I singoli quaderni possono essere acquistati sul nostro sito web: https://www.lescienze.it/plus/edicola/collane/quaderni.jsp. Dopo le uscite su materia oscura, impatto del riscaldamento globale su Artide e Antartide, Neanderthal e intelligenza artificiale è disponibile un nuovo numero, in formato PDF interattivo, scaricabile e stampabile: *Coscienza*, ovvero le neuroscienze e il problema irrisolto dell'esperienza cosciente. E da metà gennaio, appuntamento con nuovi temi.

iStock; elaborazione Le Scienze

Le numerose migrazioni del passato hanno lasciato tracce nel genoma degli italiani, portando a una popolazione tutt'altro che omogenea

Gli italiani non esistono, parola di DNA

Raccontare il passato partendo dai dati di oggi, e finire per raccontare un presente diverso da come lo crediamo. Un presente in cui «gli italiani» non esistono. O meglio: in cui non esiste una «italianità» precisa e definibile, ma esistono italiani figli di una storia complessa di migrazioni attraverso i continenti. È il risultato, molto in sintesi, della ricerca coordinata da genetisti di Oxford, Pavia e Torino e pubblicata su «Science Advances» di recente. Francesco Montinaro è uno degli autori e oggi è ricercatore all'Università di Tartu: dall'Estonia ci descrive così la sua fotografia genetica degli italiani del XXI secolo.

Ann Johansson/Getty Images

Ricerche sulla genetica degli italiani ne sono uscite tante. Che cosa c'è oggi di nuovo?

La novità è che non si guarda più a un singolo frammento di DNA, come quando si studiava il DNA mitocondriale o il cromosoma Y, ma si studiano centinaia di migliaia di mutazioni disperse nel genoma. E se un singolo pezzetto di DNA ti racconta una storia, un intero genoma te ne racconta tante, fino a permetterti un'intera narrazione su un popolo.

Per essere tecnici, abbiamo analizzato il DNA nucleare in alcune posizioni variabili, cioè i cosiddetti i polimorfismi del singolo nucleotide, indicati con la sigla SNP. In questo modo abbiamo costruito gruppi di italiani geneticamente omogenei e li abbiamo confrontati tra loro, con altre popolazioni europee, e con il Neanderthal.

I numeri della vostra ricerca

I genomi italiani esaminati erano più di 1600, provenienti da tutte le regioni: li abbiamo confrontati con circa 3600 genomi provenienti da Europa e resto del mondo. Come abbiamo fatto per assegnare i genomi italiani alle diverse regioni? Con la regola dei nonni: abbiamo preso persone, in media della classe 1950, i cui nonni erano nati tutti nella stessa area. Su ciascun genoma abbiamo analizzato 250.000 *loci* genetici.

E adesso il risultato

La genetica di una popolazione è sempre complessa. Ma nel caso degli italiani questa complessità è notevole. Tanto che il DNA di due italiani presi a caso può avere una diversità paragonabile a quella del DNA di due europei presi a caso. Questo, si presume, perché la posizione geografica della nostra penisola ne ha fatto l'approdo di numerose migrazioni del passato.

Se prendo il DNA di un europeo a caso, posso dire se è italiano o no?

La risposta è complicata. Perché oggi, con tanti loci genetici e insiemi di dati di confronto adeguati e considerato un certo grado di incertezza, forse possiamo avvicinarci a dirlo. Ma si parla di variazioni davvero minime: la variabilità tra due individui riguarda solo lo 0,1 per cento del DNA, tutto il resto è assolutamente identico. Anche tra persone di continenti diversi.

Ecco, forse la cosa più importante è l'esistenza di un cline, per cui le cose variano progressivamente lungo il continente, però non esiste un Rubicone che ci permetta di dire «da qui in poi si è italiani».

E se prendo il DNA di un abitante del Mediterraneo a caso, quindi escludendo il Nord Europa ma includendo Medio Oriente e Nord Africa?

Do la stessa risposta. Perché lo stesso cline esiste attraversando il mare.

Dunque, confrontando italiani di regioni diverse che cosa viene fuori?

A maggior ragione, tra di loro troveremo differenze minime.

di Silvia Bencivelli

CHI È

FRANCESCO MONTINARO

Ha conseguito il dottorato di ricerca in scienze medico-forensi all'Università Cattolica del Sacro Cuore di Roma nel 2015. Nello stesso anno diventa post-doc nel gruppo di ricerca di genetica evoluzionistica umana dell'Università di Oxford, guidato da Cristian Capelli. Dal 2017 è ricercatore all'Institute of Genomics dell'Università di Tartu, in Estonia.
La sua attività di ricerca scientifica riguarda lo studio delle migrazioni delle popolazioni umane, a diversi livelli geografici e temporali, e di come esse abbiano influenzato la variabilità genetica oggi osservabile. In uno dei suoi ultimi lavori ha esplorato la variabilità e la storia genetica delle popolazioni italiane.

Non troppo isolati. Processione di Sant'Efisio, a Cagliari. I Sardi hanno nel loro DNA un importante contributo che deriva da migrazioni del Neolitico.

Cortesia Francesco Montinaro (*Montinaro*)

Ma mettendo insieme il DNA di tanti di loro viene fuori la nostra storia. Abbiamo identificato tre gruppi di italiani: centro-nord, centro-sud e Sardegna. Confrontando il loro DNA si ricostruiscono le migrazioni antiche. Ed ecco un'altra novità: abbiamo trovato contributi di migrazioni che in precedenza non erano stati caratterizzati.

Cioè gli italiani sono figli di diversi fenomeni migratori. Quali?

Abbiamo distinto cinque contributi demografici principali. Il più antico è riferibile ai cacciatori-raccoglitori europei paleolitici, di circa 15.000 anni fa. È relativamente basso, circa il dieci per cento del nostro genoma, ed è disperso su tutta la penisola. Più tardi arriva un contributo neolitico, associato all'agricoltura, che in Sardegna è il più alto d'Europa. Poi in età del bronzo arriva un nuovo contributo dalle steppe pontico-caspiche, quelle tra Mar Nero e Mar Caspio, forse insieme alle lingue indoeuropee: un grosso cambiamento genetico fino a qualche anno fa misconosciuto. Dello stesso periodo abbiamo individuato un nuovo contributo da gruppi affini a quelli dell'odierno Caucaso. Infine c'è una componente più recente, e minore, risalente al medioevo arabo che interessa soprattutto l'Italia meridionale.

Ma esiste in Europa una popolazione omogenea?

No, affatto. Come non esistono popolazioni del tutto segregate dalle altre. Quelle con profili più omogenei sono i Baschi, i Sami e gli abitanti delle Orcadi. Tuttavia, nessuna popolazione può essere considerata «pura». Anche i Sardi, che fino a poco tempo fa venivano considerati un popolo a parte, che discendeva direttamente dal Neolitico, hanno avuto influssi esterni e hanno accumulato differenze.

Invece, riguardo al DNA neanderthaliano che cosa possiamo dire?

Che si trova ancora nel nostro: eredità di un incontro, diciamo così, intimo tra i Neanderthal e i nostri progenitori. E che anche qui si trova un cline: il maggior numero di varianti arcaiche del DNA attribuibili al Neanderthal si trova in Sardegna e poi in Italia settentrionale. Probabilmente le popolazioni dell'Italia meridionale hanno avuto una diminuzione relativa di queste componenti per l'arrivo, e l'influsso genetico, di popolazioni che ne contenevano meno oppure non ne contenevano affatto.

Avere più DNA di origine neanderthaliana che cosa cambia nella nostra vita?

Poco. In media un europeo o asiatico ha circa l'uno per cento di genoma ereditato da Neanderthal. Una piccola parte di esso ha un impatto biologico, ma le differenze tra popolazioni sono minime. Si tratta di geni che sono correlati alla reazione della pelle dopo l'esposizione al Sole.

Ricerche come la vostra hanno una valenza culturale, e forse politica. Ne hanno anche una applicativa?

Sì, perché è importante conoscere la struttura genetica della popolazione, per esempio per studiare malattie e terapie. Quanto alla valenza politica, credo che sia sbagliato: non dovremmo aver bisogno della genetica per costruire regole sociali. Ci basti sapere che non esistono individui rossi e individui blu: se li vediamo così diversi è solo perché ignoriamo la grande variabilità genetica del grande mosaico europeo. Anzi, umano.

Moveo Walks ha sviluppato un dispositivo unico nel suo genere per rendere più facile la camminata a persone con problemi di deambulazione

Un esoscheletro per camminare meglio

Confortevole, leggero, economico. Può un esoscheletro, un sistema che aiuta a camminare chi ha difficoltà motorie, avere tutte queste caratteristiche? Il pensiero corre agli apparati che una volta indossati fanno sembrare chi li veste una specie di robot, pieni di meccanismi meccanici rigidi e lucenti. Nulla di confortevole, almeno alla vista, e di leggero.

Ma Fausto Panizzolo pensa che un'altra via sia possibile: comodo, non pesante e che si possa acquistare senza spendere una fortuna, così vuole il suo esoscheletro. Ingegnere biomedico laureato all'Università di Padova, Panizzolo trascorre sette anni in giro per il mondo a fare ricerca in Canada, Australia e Stati Uniti. Qui si ferma alla School of Engineering and Applied Sciences della Harvard University a Cambridge, dove lavora alla realizzazione di Exosuit, una tuta intelligente capace di intuire e aiutare il movimento grazie a sensori: un esoscheletro fatto di tessuto. Il suo compito è studiare la funzione muscolare per carpire i segreti del cammino e soprattutto il dispendio energetico associato a ogni passo. «La specializzazione in biomeccanica mi ha permesso di contribuire con un'analisi dei test effettuati sulle persone per valutare la prestazione della camminata e quindi fornire indicazioni per *design* e sviluppo dei nuovi esoscheletri», racconta il giovane ingegnere.

Cortesia Moveo Walks (*foto in questa pagina e nella pagina a fronte*)

Un passo dopo l'altro

A finanziare la ricerca effettuata nel laboratorio di Boston era la statunitense Defense Advanced Research Projects Agency incaricata dello sviluppo di nuove tecnologie per uso militare, con l'obiettivo di mettere a punto un esoscheletro che aiutasse militari, vigili del fuoco, personale impegnato nel primo soccorso in caso di attentati o di disastri naturali, a portare sulla spalle grandi pesi senza particolare sforzo. «Un lavoro affascinante e stimolante che mi ha permesso di conoscere molti dispositivi e di ragionare sul fatto che volevo sviluppare una mia linea di ricerca mia», aggiunge Panizzolo.

A Boston la squadra è ampia – circa 40 persone – e l'ingegnere italiano è responsabile di uno dei gruppi di lavoro. A 35 anni, però, sente che quella posizione gli sta stretta e che per fare qualcosa di suo deve tornare in Italia. Ritorna dove aveva iniziato, a Padova, e qui convince un amico, Livio Valenti, che ha esperienza di imprenditoria ma poco sa di biomeccanica e robotica, della bontà della sua idea. «Gli ho dovuto dimostrare non solo che produrre quello che avevo in mente era possibile, ma anche che ci fosse un mercato potenziale grande abbastanza per accogliere il nostro prodotto», racconta ancora Panizzolo. Così, nel 2017 nasce Moveo Walks, azienda finanziata da capitali privati, a cui l'ingegnere padovano si dedica anima e corpo. I risultati arrivano: si raccolgono i primi finanziamenti, nel 2018 il progetto arriva in finale del premio «Gaetano Marzotto» per l'innovazione, vengono assunti i primi collaboratori. L'azienda ha sede a Boston, dove lavora un altro collaboratore di Panizzolo, anch'egli italiano, e a Padova, presso l'incubatore Paradigma; ed è qui che si conduce la ricerca.

A rendere Exoband, il dispositivo di Moveo Walks, così interessante e unico nel suo genere, è il fatto che si basa solo su elementi passivi; non c'è motore, quindi non ci sono batterie, nessun marchingegno particolare o sensore: grazie a delle molle, per spingere la gamba nel momento della risalita si sfrutta l'energia con cui la gamba è atterrata. «Le molle immagazzinano l'energia generata nella camminata nel momento della frenata quando il piede tocca il suolo, poi aiutano i muscoli flessori dell'anca, che permettono di tirar su la gamba, a fare il passo successivo», specifica Panizzolo. Insomma, il sistema si autoalimenta in una specie di riciclo energetico. Soprattutto è leggero perché non c'è peso aggiuntivo dato da elementi meccanici o elettronici necessari per comandare il sistema di attuazione: un risparmio di chilogrammi e denaro.

L'esoscheletro made in Padova è anche comodo: per la vestibi-

di Letizia Gabaglio

Exoband, il dispositivo progettato e realizzato da Moveo Walks, si basa solo su elementi passivi, non c'è motore, quindi non ci sono batterie, nessun marchingegno particolare o sensore.

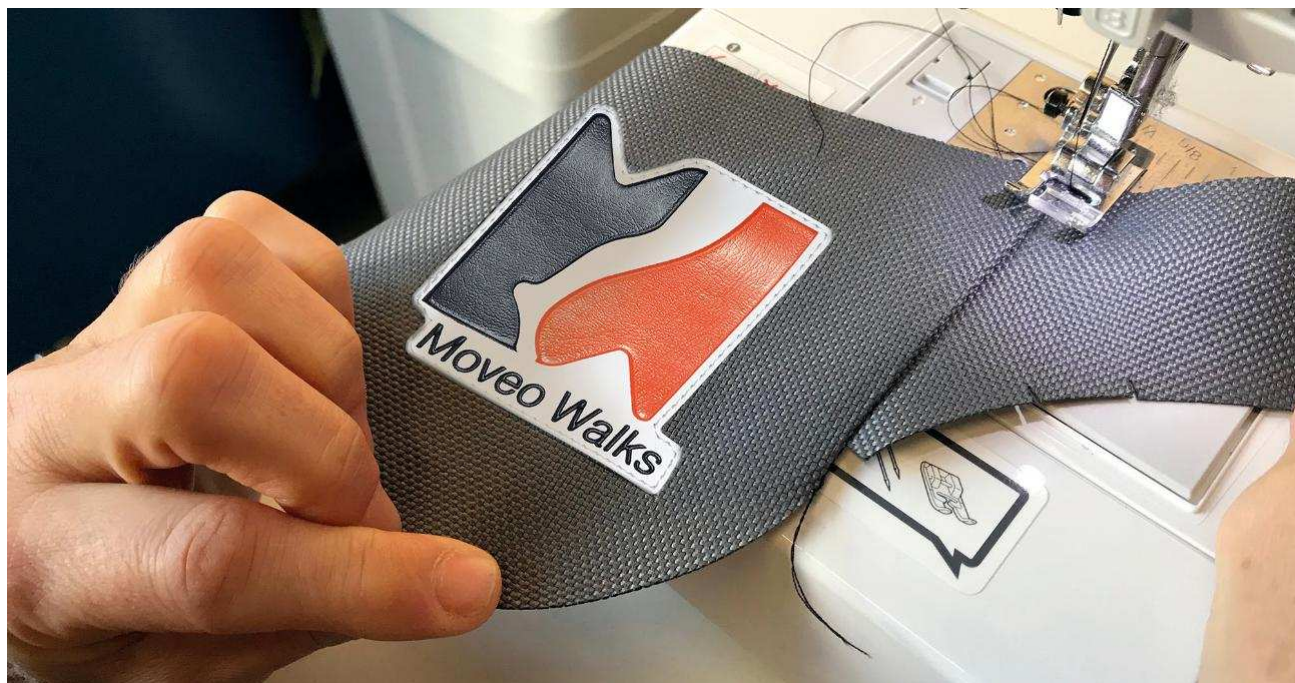
LA SCHEDA - MOVEO WALKS

Azienda fondata nel 2017

Persone di riferimento: Fausto Panizzolo e Livio Valenti (amministratore delegato)

Sito: www.moveowalks.com – www.facebook.com/moveowalks **Mail:** info@moveowalks.com

Numero di brevetti: 1 (pendente)

Dipendenti-collaboratori: 4

lità l'ingegnere si è ispirato al lavoro fatto a Boston e ha progettato una sorta di pantaloncino in tessuto, in cui una cintura regge i cosciali. Una volta pronto il prototipo, è arrivato il momento di testarne l'efficacia, e anche in questo caso i risultati sono stati più che convincenti e sono stati pubblicati in un articolo sul «Journal of Neuroengineering and Rehabilitation».

«Abbiamo poi iniziato una sperimentazione al Centro medico di fisioterapia di Padova che coinvolge pazienti con difficoltà motorie derivate da diverse patologie: ci sono malati di sclerosi multipla, che hanno avuto un ictus, affetti da Parkinson, poliomielite, e molto altro. Osserviamo che il nostro prodotto li aiuta a camminare meglio e a fare meno fatica perché la camminata è più funzionale», spiega Panizzolo. Non si tratta di far tornare a camminare chi purtroppo non ha più l'uso delle gambe, ma di rendere più facile un'attività altrimenti dispendiosa in termini di energia fisica e mentale. Grazie alla maggiore stabilità del tronco e all'aumento della forza muscolare, i malati riescono a percorrere nello stesso tempo una distanza maggiore e a correre un minor rischio di cadute. «I risultati che stiamo ottenendo saranno oggetto di una nuova pubblicazione. Il nostro esoscheletro non era stato pensato come ausilio per persone affette da patologia, ma alla luce di quello che abbiamo visto nella pratica vogliamo proporlo anche in questi casi. Aprendo quindi un'altra fetta di mercato importante», sottolinea l'ingegnere.

Già, perché nelle intenzioni iniziali dei giovani imprenditori a usufruire dell'esoscheletro dovevano essere principalmente gli anziani con problemi di deambulazione e usarlo alla stregua di un bastone o di un plantare, ma la sua efficacia li sta convincendo ad allargare il potenziale bacino d'utenza e a guardare al prossimo modello, in cui verranno inseriti sensori per poter monitorare da remoto le attività di chi lo indossa, magari all'interno di un programma di riabilitazione.

Senza però correre troppo, questo è il periodo in cui Moveo Walks è impegnata nella produzione dei primi prodotti: «Abbiamo ricevuto molte richieste, anche da parte di persone che lo avevano provato durante la sperimentazione e che ora non vogliono rinunciare a poter camminare meglio», conclude Panizzolo. «Per noi è una grande soddisfazione, è la ragione profonda per cui abbiamo iniziato questo progetto: migliorare la vita delle persone». Un passo alla volta.

di Piergiorgio Odifreddi

professore ordinario di logica matematica all'Università di Torino
e *visiting professor* alla Cornell University di Ithaca (New York)

Leggere una formula

Come i testi letterari, anche le equazioni possono avere livelli di lettura differenti

Nelle sue memorabili *Lezioni di letteratura* Vladimir Nabokov descrive tre livelli di lettura di un testo letterario. Il lettore «infantile» ne legge le righe, identificandosi con i personaggi e appassionandosi alle loro vicende. Il lettore «adolescenziale» legge tra le righe, sintonizzandosi sul supposto messaggio dell'autore. Il lettore «maturo» legge oltre le righe, analizzando la vera struttura dell'opera.

Ma lo scrittore russo sapeva bene che «il confine tra un'opera d'arte e un lavoro scientifico non è così chiaro come in genere si pensa». Dunque, ciò che diceva a proposito della lettura dei romanzi si può applicare anche allo studio delle formule.

Secondo e terzo grado

Prendiamo, per esempio, la soluzione dell'equazione di secondo grado $ax^2 + bx + c = 0$ tramite la formula «meno b più o meno la radice quadrata di b^2 meno $4ac$, diviso $2a$». La lettura infantile, che viene appunto raccontata ai bambini alle elementari o alle medie, è che la storia (l'equazione di secondo grado) fornisce indizi palesi (i tre coefficienti) che permettono di smascherare la variabile (le due soluzioni) attraverso un'indagine poliziesca (la formula).

La lettura adolescenziale, insegnata alle superiori, è che la formula esplicita di risoluzione dell'equazione di secondo grado contiene molti messaggi impliciti. Anzitutto, poiché essa coinvolge una radice quadrata del determinante $b^2 - 4ac$, a seconda che questo sia positivo, nullo o negativo ci saranno due soluzioni reali distinte, una soluzione reale doppia o nessuna soluzione reale, ma due soluzioni complesse coniugate.

Inoltre, poiché la formula fa intervenire un «più o meno», esiste una simmetria nascosta fra le due soluzioni, che si può facilmente esplicitare. Per esempio, la loro somma annulla i due segni, ed è dunque uguale a $-b/a$. Il loro prodotto, invece, si riduce al prodotto notevole di una somma per una differenza, ed è dunque uguale a c/a.

La lettura matura, rivelata all'università, situa l'equazione di secondo grado in un contesto generale. Anzitutto, il teorema fondamentale dell'algebra enunciato da Albert Girard nel 1629 e dimostrato da Jean-Robert Argand nel 1806, stabilisce che un polinomio di grado n a coefficenti complessi ha esattamente n soluzioni complesse, e può essere fattorizzato nel prodotto di n fattori complessi lineari.

Procedere al contrario

Usando questa fattorizzazione, si può inoltre dimostrare che le relazioni tra i coefficienti dell'equazione e le combinazioni delle soluzioni continuano a valere per polinomi di grado n qualunque, e si estendono alle «formule di Viète», dimostrate da Girard nel 1629 e riscoperte da Isaac Newton nel 1666. Per esempio, nell'equazione di terzo grado $ax^3 + bx^2 + cx + d$ la somma delle soluzioni è $-b/a$, la somma dei prodotti delle coppie di soluzioni è c/a, e il prodotto delle soluzioni è $-d/a$.

In particolare, i coefficienti di un'equazione si possono esprimere come polinomi simmetrici delle soluzioni, chiamati «elementari» perché permettono di ricostruire qualunque altro polinomio simmetrico delle soluzioni dell'equazione. Si può dunque pensare di procedere al contrario, nel senso di determinare non i coefficienti a partire dalle soluzioni, ma le soluzioni a partire dai coefficienti.

Studiando le permutazioni delle soluzioni che ne lasciano invariati i polinomi simmetrici, Joseph-Louis Lagrange ha mostrato nel 1770 come ricavare le formule rinascimentali per le equazioni di terzo e quarto grado. Paolo Ruffini ha scoperto nel 1799 che non esiste un'analoga formula per l'equazione generale di quinto grado. Ed Évariste Galois ha sviluppato nel 1830 la teoria che permette di determinare se una data equazione ammette una formula risolutiva, e in tal caso come trovarla.

di Elena Castellani

professore associato, Dipartimento di filosofia,
Università di Firenze

Spiegazione e comprensione

La questione del ruolo epistemico della comprensione scientifica

Accade spesso che alcune nozioni d'uso comune e apparentemente non problematiche suscitino invece discussioni in ambito filosofico, specie se riferite alla scienza. Questo è senz'altro il caso della nozione di comprensione. Sembra naturale pensare che uno degli scopi principali della ricerca scientifica sia di permetterci di comprendere il mondo in cui viviamo. Le teorie scientifiche ci forniscono le lenti attraverso cui guardare il mondo e, specialmente se adottiamo una posizione realista, anche la chiave di spiegazione di quanto succede intorno a noi. Alla spiegazione viene poi naturalmente connessa la comprensione: noi comprendiamo quello che avviene perché la scienza ce lo spiega. Ma che cosa vuol dire «comprendere» un fenomeno e in che modo la spiegazione ce ne fornisce la comprensione?

L'aspetto contestuale e soggettivo

Una risposta comune considera il fattore della comprensione come un complemento (o una conseguenza) di tipo puramente psicologico e soggettivo della spiegazione scientifica. In quanto tale, la comprensione scientifica non avrebbe un proprio ruolo epistemico: tutto quello che la filosofia della scienza avrebbe da dire sulla nozione di comprensione sarebbe «ancillare» all'analisi della nozione di spiegazione scientifica, e questo indipendentemente dalla concezione di spiegazione adottata.

Secondo il filosofo olandese Henk de Regt, autore di *Understanding Scientific Understanding* (2017), che gli è valso il Premio Lakatos 2019 per la filosofia della scienza, le cose non stanno così. La sua tesi è che ci sia qualcosa di più nella comprensione che non è catturato se la si considera come semplice effetto collaterale della spiegazione nella scienza. Innanzitutto, c'è un aspetto contestuale e soggettivo. Per esempio, per William Thomson (più noto come Lord Kelvin) la comprensione di un fenomeno fisico risiedeva nella possibilità di costruirne un modello meccanico, perché questa era la modalità tipica del contesto in cui operava; invece Erwin Schrödinger, in riferimento alla possibilità di comprendere i fenomeni quantistici, poneva l'accento sulla capacità di «visualizzazione» nello spazio e nel tempo. Questa variabilità del modo d'intendere la comprensione, come nota de Regt, è ancora più marcata nel passare da disciplina a disciplina: per esempio, nella biologia sperimentale la comprensione può derivare dalla manipolazione diretta di organismi, mentre nel caso di discipline come l'economia è più facile che si cerchi di comprendere i fenomeni con modelli matematici o simulazioni.

Più attenzione alla pratica scientifica

Nonostante queste diverse modalità della comprensione scientifica, è possibile comunque individuarne aspetti caratterizzanti? De Regt risponde identificando il prerequisito per la comprensione d'un fenomeno nell'intelligibilità della teoria che lo tratta. Nella sua accezione, una teoria è intelligibile per quegli scienziati capaci di usarla in modo efficace nella descrizione e spiegazione dei fenomeni oggetto di studio, grazie a «qualità» della teoria come, per esempio, la visualizzabilità che richiedeva Schrödinger per l'intelligibilità della meccanica quantistica. Quindi, secondo de Regt, quando Feynman affermava che «nessuno davvero comprende la meccanica quantistica» non intendeva sostenere che nessuno comprende la teoria con cui si descrive il mondo quantistico: non è questa teoria a non essere intelligibile (infatti si sa come usarla con successo), ma è il mondo descritto dalla teoria che è difficile da comprendere.

Si può essere più o meno d'accordo sull'impostazione di de Regt, ma la sua analisi rientra nell'attuale tendenza dei filosofi della scienza a prestare maggiore attenzione all'effettiva pratica scientifica, anche nel trattare questioni epistemologiche di carattere generale.

di Giorgio Manzi

ordinario di paleoantropologia alla Sapienza Università di Roma;
socio corrispondente dell'Accademia Nazionale dei Lincei

Le proteine del Gigantopithecus

Una ricerca a partecipazione italiana ha analizzato il proteoma del più grande primate mai esistito

All'Università di Copenaghen si candidano alla leadership in paleo-proteomica; e può far piacere che in questo contesto si parli anche in italiano. Lo dimostra, fra gli altri, il recente articolo su «Nature» – a firma di Frido Walker, Enrico Cappellini e diversi altri autori, anche da Barcellona e dalla Cina – sulla caratterizzazione del *Gigantopithecus*, la colossale scimmia antropomorfa del Sudest asiatico che si estinse solo un centinaio di millenni or sono.

La paleo-proteomica è un campo di ricerca emerso da poco, che si è subito rivelato incredibilmente promettente ed è diventato un filone in rapida espansione. La sua versione neontologica, la proteomica, si occupa del profilo completo delle proteine presenti nelle cellule, nei tessuti e nel corpo intero; come la genomica, che studia il corredo genico di un organismo. Tuttavia, se nel genoma umano (per esempio) contiamo circa 20.000 geni, il nostro proteoma supera il milione. La paleoproteomica ne è la declinazione paleontologica; si occupa cioè del proteoma di organismi estinti, sequenziando proteine «antiche» tramite spettrometria di massa e altre procedure di analisi e di controllo. Trova applicazioni potenziali interessanti e ad ampio spettro: dalla paleontologia, all'archeologia, all'analisi di manufatti, alimenti, opere d'arte e così via.

«Primati panda»

Il *Gigantopithecus* è il più grande primate mai esistito. Se ne conoscono tre specie: *G. blacki*, *G. bilaspurensis* e *G. giganteus*. Noto a partire da un dente molare scoperto in una farmacia cinese (sic!) nel 1935, ne abbiamo oggi un certo numero di reperti fossili (per lo più mandibole e denti) distribuiti nella mezzaluna a sud-est dell'Himalaya, composta da India, Cina e penisola indonesiana. I reperti più antichi risalgono al Miocene, mentre i più recenti precedono di poco la diffusione in Asia, in Australia e in America di *Homo sapiens*.

È stato stimato che un *G. blacki* in postura eretta potesse raggiungere una statura di tre metri, con un peso che poteva superare la mezza tonnellata, ma potrebbero essere ipotesi eccessive, in quanto basate su porzioni dell'apparato di masticazione (non sono mai stati trovati resti del postcranio). È anche possibile che le diverse specie di *Gigantopithecus* avessero una dieta per lo più basata sul bambù, cosa che ne farebbe una sorta di «primati panda», come anche la particolare usura delle corone dentarie sembrerebbe indicare. Infine, siamo però nel campo della pseudoscienza chiamata «criptozoologia», si è parlato del *Gigantopithecus* come origine delle leggende degli Yeti (Asia orientale) e dei Bigfoot (Nord America). Chissà che non ci sia un fondo di verità in rapporto alla diffusione di *H. sapiens*.

Indietro nell'evoluzione

Ma veniamo al nuovo studio dei ricercatori dell'Università di Copenaghen e dei loro colleghi. Sequenziando il proteoma incluso nello smalto dentario di un resto fossile di *Gigantopithecus* di 1,9 milioni di anni fa, scoperto in Cina meridionale, ne hanno potuto accertare la posizione evolutiva e la stretta relazione genetica con gli attuali orangutan, le scimmie rosse di Borneo e Sumatra. Dov'è la novità (potrebbe dire qualche critico)? Si sapeva già o, quanto meno, si ipotizzava da tempo questo tipo di relazione filogenetica e tassonomica con gli orangutan.

In verità, l'importanza di questo studio è soprattutto un'altra. Si tratta della prima volta in cui materiale genetico così antico è stato recuperato da un fossile proveniente da ambienti caldo-umidi. E questo apre finestre, fino a oggi impensabili, sulla possibilità di avere informazioni genetiche (ancorché sulla base del proteoma) da reperti che figurino nel percorso della nostra evoluzione e siano antichi almeno quanto il *Gigantopithecus* analizzato in questo studio. O, forse, anche di più.

di Amedeo Balbi

professore associato di astronomia e astrofisica
al Dipartimento di fisica dell'Università di Roma Tor Vergata

Il buco nero quasi impossibile

Secondo le teorie sulla formazione stellare non dovrebbe esistere, ma è probabile che sia solo una rarità

Continua a essere un periodo piuttosto interessante per la caccia ai buchi neri. L'ultima novità in merito è la scoperta di un buco nero di circa 70 masse solari, etichettato un po' enfaticamente come «impossibile». È proprio così? Davvero, come è stato detto, un buco nero del genere non dovrebbe esistere? Per provare a capire meglio la faccenda, bisogna dare un po' di contesto.

Intanto, diciamo subito che la cosa davvero nuova e interessante nella ricerca pubblicato a fine novembre su «Nature» da Jifeng Liu, del Key del Laboratory of Optical Astronomy della Chinese Academy of Sciences, e colleghi è la tecnica di osservazione sfruttata dagli astronomi.

Di solito, la presenza di un buco nero viene notata tramite il gas che esso inghiotte e che, riscaldandosi, emette grandi quantità di raggi X. Questo fa sì che i buchi neri di piccola taglia (diciamo di masse comparabili a quelle di una stella) siano scoperti più facilmente quando sono in un sistema binario, ovvero in cui c'è anche una stella vicina che possa cedere materiale. Stavolta, tuttavia, gli astronomi non hanno usato l'emissione di raggi X, che è peraltro quasi assente, ma il moto orbitale della stella compagna – chiamata LB-1 – dedotto dallo spostamento Doppler della sua luce.

È una tecnica ormai usata abitualmente per rivelare la presenza di pianeti extrasolari, ma una novità assoluta per quanto riguarda l'osservazione di buchi neri.

Candidato unico

Così, si è visto che LB-1 orbita ogni 79 giorni attorno a un oggetto non direttamente visibile, che ha una massa circa 70 volte più grande di quella del Sole. Un valore che non lascia altri candidati se non un buco nero, la cui formazione sembrerebbe però difficile da spiegare, stando a quello che sappiamo dell'evoluzione stellare. Come mai?

I modelli teorici prevedono che buchi neri di massa stellare si formino dal collasso del nucleo di stelle molto massicce.

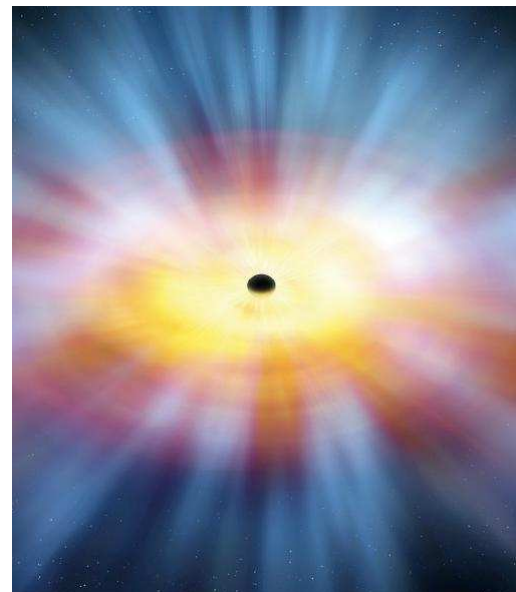
Questo è il quadro generale: però i dettagli del processo sono più complicati, perché non dipendono solo dalla massa della stella ma anche da fattori come il suo contenuto di elementi pesanti, chiamato «metallicità».

In breve, la maggior parte degli studiosi ritiene che, in condizioni di metallicità simili a quelle in cui si trova LB-1 (e quindi, verosimilmente, anche la stella progenitrice del buco nero), il nucleo collassato di una stella non dovrebbe (sottolineiamo il condizionale, perché lo scenario teorico è incerto) formare buchi neri molto più grandi di circa 25 masse solari.

Ma, un momento: in realtà, buchi neri con masse più grandi di così, ovvero di diverse decine di masse solari, sono stati osservati più volte negli ultimi anni, attraverso le onde gravitazionali catturate dalle antenne LIGO e Virgo. Sì, ma in quel caso si tratta di buchi neri prodotti dallo scontro di buchi neri più piccoli.

Eventualità eccitante

Una possibilità, dunque, è che il buco nero nel sistema di LB-1 si sia formato dalla fusione tra due buchi neri, o tra una stella massiccia e un buco nero, in un sistema che conteneva anche una terza stella rimasta in orbita. Non è neanche da escludere che in realtà si sia osservata una coppia di buchi neri molto vicini tra loro, una eventualità che lo studio descrive come «eccitante». È molto meno probabile, invece, che LB-1 sia stata catturata successivamente alla formazione del buco nero.

Insomma, siamo senz'altro in presenza di una rarità, o quantomeno di una situazione mai osservata prima e di cui non è ancora chiara la frequenza: ma chiamarla «impossibile» è una esagerazione. Quello che è certo è che c'è ancora molto da fare e da capire, e che adesso c'è una nuova tecnica di osservazione che potrà essere usata, in futuro, per studiare altri casi analoghi.

Nuove applicazioni. La tecnica che ha portato alla scoperta di LB-1 è usata da tempo per individuare i pianeti extrasolari, ma non era mai stata applicata prima all'osservazione di buchi neri.

Detlev Van Ravenswaay/SPL/AGF

ANTROPOLOGIA

La musica è universale

Il canto è presente in ogni società e ovunque esistono canzoni con parole

Rudi Von Briel/Getty Images

Stesse funzioni.
La prima analisi sistematica su analogie e differenze fra i brani vocali di tutto il globo ha scoperto che ogni cultura ha canti con le stesse funzioni sociali e che quelli di uno stesso genere si somigliano dappertutto.

La musica è un linguaggio universale? L'idea è diffusa, ma convince poco gran parte degli studiosi che, di fronte all'enorme varietà di generi e stili e alla difficoltà di confrontare le musiche di società diverse, avevano un po' perso le speranze di trovarvi caratteri universali. Le speranze le riaccende ora la prima analisi sistematica su analogie e differenze fra le musiche vocali di tutto il pianeta, pubblicata su «Science» da Samuel Mehr e firmata fra gli altri da Steven Pinker, entrambi alla Harvard University.

Mehr si è concentrato sul canto, perché la voce è il più universale degli strumenti, e ne ha scelto quattro tipi: ninnananne, canzoni d'amore, canzoni da ballo e per i rituali di guarigione. Scandagliando un secolo di studi etnomusicali ha creato due grandi raccolte, una di registrazioni dei canti e l'altra di testi che ne illustrano modi e contesti di esecuzione. Ha ricavato così due *corpus* che definisce «la storia naturale del canto», con migliaia di canzoni di oltre 300 culture, ritenute rappresentative della varietà globale. Con questi dati, ha analizzato molte caratteristiche acustiche delle canzoni, osservando che variano soprattutto lungo tre dimensioni: formalità (canzoni per cerimonie, con un vasto pubblico di adulti e uso di strumenti, contro quelle per bambini o piccoli gruppi); livello di eccitazione (per balli ed eventi con molti musicisti e ascoltatori, contro gli usi pacati fra poche persone); religiosità (canti per rituali religiosi, funerali e simili).

Il canto è presente senza eccezioni in ogni società, ha concluso innanzitutto Mehr, e ovunque esistono canzoni con parole. Ma quel che più conta, ogni cultura ha canti con le stesse funzioni sociali, come il ballo, e quelli di uno stesso genere si somigliano ovunque. Le canzoni da ballo per esempio sono più veloci e ritmiche delle ninnananne; mentre i canti di guarigione sono più ripetitivi dei ballabili.

In effetti, c'è più differenza fra i diversi canti di una stessa società che fra società diverse; la varietà del panorama musicale mondiale deriva quindi in gran parte dalle differenze fra i generi e non fra le culture. E il nostro orecchio è sintonizzato su questi generi: anche chi non ha mai sentito canzoni di un certo tipo – come gli occidentali nel caso dei canti di guarigione – se li ascolta li riconosce, così come fanno gli algoritmi di apprendimento automatico.

L'altra scoperta cruciale, infine, è che tutte le culture hanno melodie centrate su una nota dominante e composte con una scala correlata a essa (per esempio il Do e la scala di Do maggiore). «La struttura generale delle melodie potrebbe discendere da qualche struttura cognitiva basilare della nostra mente», ipotizza quindi Mehr. Avremmo insomma una sorta di grammatica innata della musica, come quella ipotizzata per il linguaggio.

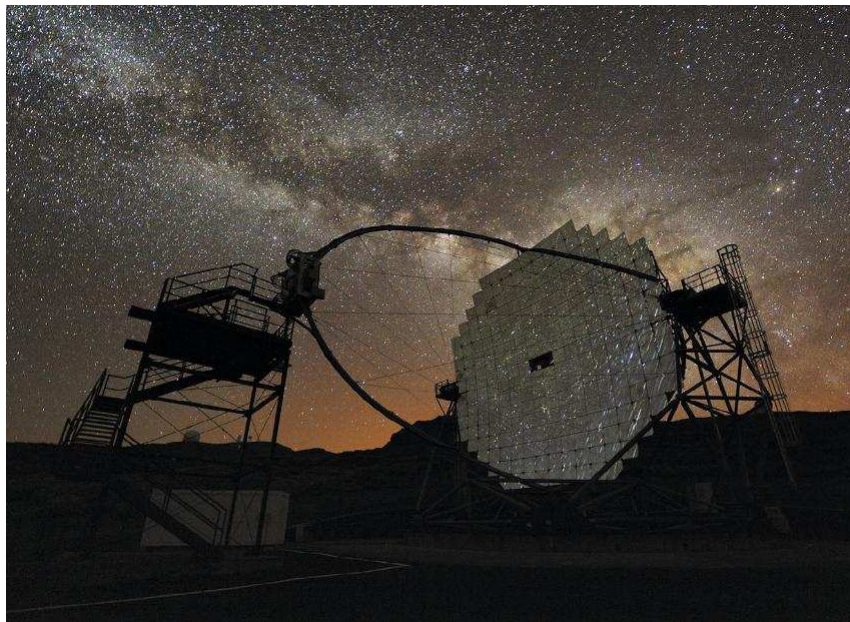
Giovanni Sabato

ASTROFISICA

Il lampo gamma più brillante

Rilevata un'emissione di fotoni con un'energia senza precedenti

Tra i fenomeni astrofisici più affascinanti ci sono i lampi di raggi gamma, eventi violentissimi che si verificano nel corso di processi catastrofici, come la morte di una stella molto massiccia o la fusione tra due stelle di neutroni. Il 14 gennaio 2019 ne è stato osservato uno particolarmente violento tra le costellazioni dell'Eridano e quella della Fornace, a ben sette miliardi di anni luce da noi. Quasi un anno dopo, i ricercatori della collaborazione MAGIC, sfruttando i dati raccolti da una coppia di telescopi situati alle Isole Canarie, appositamente progettati per rilevare raggi gamma in modo indiretto, hanno pubblicato su «Nature» l'analisi dettagliata del fenomeno: si tratta del lampo gamma più energetico mai osservato, con l'emissione di fotoni di energia dell'ordine del teraelettronvolt, circa 1000 miliardi di volte superiore all'energia della luce visibile.

Tipicamente questi eventi, che possono durare da poche frazioni di secondo fino a diversi minuti, sono caratterizzati da un *flash* iniziale di raggi gamma (la radiazione elettromagnetica più energetica), seguita da una fase definita *afterglow*, in cui vengono emessi fotoni appartenenti a un ampio spettro di frequenze ed energie più basse (dalle onde radio fino ai raggi X). Quest'ultimo aspetto ha permesso di ottenere un'analisi estremamente variegata e precisa del fenomeno osservato, grazie anche al coinvolgimento di un gran numero di telescopi in tutto il mondo, che hanno studiato i fotoni emessi in tanti «canali» di frequenza diversa.

In particolare l'analisi ha mostrato che il fenomeno fisico alla base di un'emissione così violenta potrebbe essere il cosiddetto «effetto Compton inverso», secondo cui i fotoni altamente energetici osservati avrebbero ricevuto l'energia da elettroni di energia ancora più elevata, accelerati dalla violenta esplosione.

Matteo Serra

Un nuovo limite per la massa del neutrino

I neutrini sono da sempre un problema per i fisici. Il fatto che siano particelle elettricamente neutre e che interagiscano debolmente con la materia le rende particolarmente evanescenti e difficili da rivelare. Ma a renderli ancora più complicati da studiare è la loro leggerezza, ovvero il fatto che siano dotati di una massa piccolissima, tanto che per lungo tempo si è addirittura pensato che ne fossero privi. Solo in tempi recenti, infatti, la scoperta del fenomeno noto come «oscillazione dei neutrini» – confermato nel 2001 – ha permesso ai fisici di concludere che i neutrini sono dotati di massa.

Gli esperimenti volti a determinare la massa del neutrino o, meglio, delle tre famiglie in cui si dividono i neutrini, finora sono riusciti a fornire solo limiti superiori, ma nessuno ancora è riuscito a stabilire con precisione quale sia il valore effettivo. Fra questi, tuttavia, l'esperimento tedesco KATRIN (acronimo di Karlsruhe Tritium Neutrino) sembra piuttosto promettente: a settembre, dopo appena quattro settimane dall'avvio della fase operativa, la collaborazione è riuscita a trovare un nuovo limite superiore per la massa di questa particella. Adesso questo limite, grazie a KATRIN, è attestato a 1,1 elettronvolt, mentre esperimenti analoghi si erano fermati a un limite superiore di due elettronvolt. Per confronto, la massa dell'elettrone vale oltre 500.000 elettronvolt (l'elettronvolt, o eV, è un'unità di misura dell'energia con cui si esprime la massa equivalente delle particelle, secondo la nota formula di Albert Einstein che equipara massa ed energia).

La collaborazione che lavora all'esperimento KATRIN conta di arrivare a trovare un valore preciso della massa di questa particella, a patto che si trovi sopra la soglia di sensibilità dello strumento, pari a 0,2 elettronvolt. Se il neutrino fosse ancora più leggero, dovremmo affidarci ad altre misurazioni di altri esperimenti. Intanto i cosmologi aspettano di conoscere quanto «pesa» realmente questa particella, per verificare la correttezza dei loro modelli di evoluzione dell'universo, che dipendono anche dalla sua massa.

Emiliano Ricci

SPL/AGF

PLANETOLOGIA

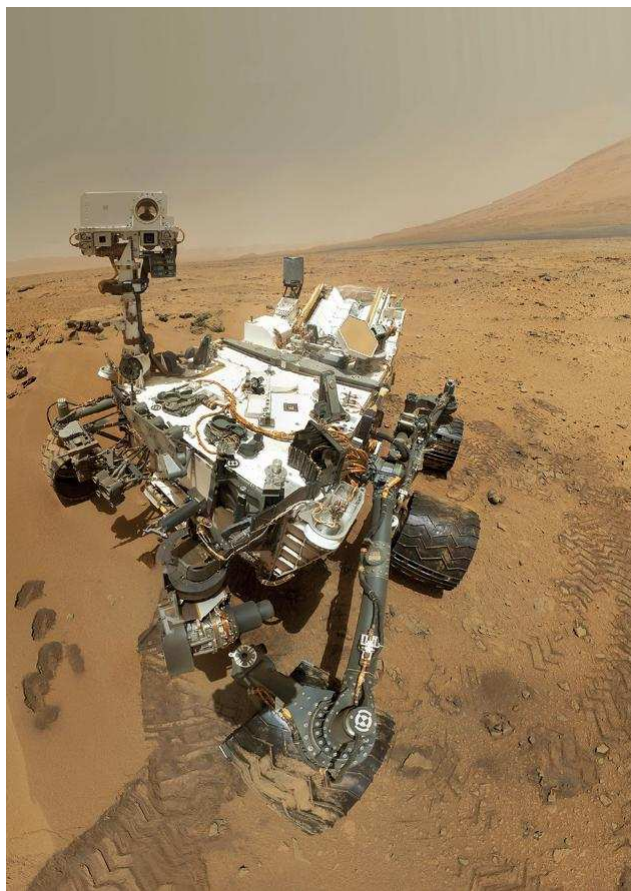
Il mistero dell'ossigeno su Marte

Variazioni stagionali atmosferiche di questo gas stupiscono gli scienziati

Arrivato sul suolo marziano il 6 agosto 2012, il rover della NASA Curiosity studia l'atmosfera e il suolo del Pianeta Rosso per delinearne la storia e scoprire se sia stato (o sia tuttora) capace di sostenere la vita. In oltre sette anni, il Sample Analysis at Mars (SAM), uno dei tanti strumenti a bordo del rover, ha analizzato l'atmosfera di Marte, confermando non solo che è composta per il 95 per cento da anidride carbonica, per il 2,6 per cento da azoto molecolare e per l'1,9 per cento da argon, ma anche che le concentrazioni di alcuni gas hanno un andamento stagionale le cui origini sono tuttora un mistero. In particolare, a stupire gli astronomi è la variabilità della quantità di ossigeno presente nell'aria (in media inferiore allo 0,2 per cento), che nel periodo primavera-estate supera del 30 per cento i valori previsti, per poi tornare a livelli normali nel periodo autunno-inverno.

A descrivere in dettaglio lo studio sul «Journal of Geophysical Research: Planets» è il gruppo guidato da Melissa Trainer, del Goddard Space Flight Center della NASA. I ricercatori hanno scoperto che, mentre alcuni gas, come azoto e argon, hanno andamenti stagionali regolari, l'ossigeno ha un aumento imprevisto e tutt'ora inspiegabile di concentrazione nelle stagioni più calde. A creare ulteriore stupore fra gli autori è il fatto che anche il metano segue un andamento analogo a quello dell'ossigeno, come se le emissioni (e i successivi assorbimenti) dei due gas fossero associate. Una correlazione che, secondo Trainer e colleghi, non può essere casuale. Fra le ipotesi proposte c'è una possibile origine biologica, anche se quella geologica, ovvero che ossigeno e metano vengano liberati dalle rocce del suolo marziano attraverso un meccanismo ancora da scoprire, sembra la più probabile. Marte non finisce davvero mai di stupire.

Emiliano Ricci

NASA/SPL/AGF

E se l'universo fosse chiuso?

Se decideste di fare un lungo viaggio interstellare, a un certo punto potreste ritrovarvi al punto di partenza. È la sconcertante conclusione a cui è arrivato un gruppo di ricerca diretto da Alessandro Melchiorri della «Sapienza» Università di Roma, che ha analizzato alcuni dati registrati dal satellite Planck: le misurazioni mostrerebbero che l'universo avrebbe forma sferica, in contrasto con la gran parte degli altri dati cosmologici, secondo cui l'universo sarebbe invece piatto. I risultati sono stati pubblicati su «Nature Astronomy».
La missione Planck dell'Agenzia spaziale europea è stata operativa tra il 2009 e il 2013 con l'obiettivo principale di mappare la radiazione cosmica di fondo, ossia il residuo del big bang che tuttora permea l'intero universo. Melchiorri e colleghi si sono occupati in particolare di studiare gli effetti di lente gravitazionale, una conseguenza della teoria generale della relatività di Albert Einstein: a causa della curvatura dello spazio-tempo, la luce proveniente da una fonte di luce distante può subire una deflessione, risultando deformata o moltiplicata agli occhi di un osservatore.
In questo caso i ricercatori hanno misurato una quantità di lenti gravitazionali molto maggiore del previsto. È questo risultato può essere spiegato (con una confidenza superiore al 99 per cento) solo ammettendo una curvatura positiva dell'universo, ovvero una forma sferica e quindi chiusa.
Il problema è che questo risultato contraddice sia il modello cosmologico standard (l'impalcatura teorica che descrive la cosmologia) sia la quasi totalità di tutti gli altri dati osservativi registrati negli ultimi decenni, secondo cui l'universo sarebbe in realtà piatto come un foglio di carta. Se confermato, il risultato costringerebbe a un ripensamento profondo della cosmologia. Secondo alcuni esperti però l'effetto osservato potrebbe essere dovuto a una semplice fluttuazione statistica: se così fosse, nuove osservazioni future potrebbero chiarire il mistero.

Matteo Serra

SCIENZE DELLA TERRA

Perché l'Artico riflette meno

Analizzate le cause del declino dell'albedo nella regione

Per rendersene conto, basta alternare una maglia nera e una bianca sotto il solleone: le superfici chiare riflettono più radiazione solare di quanta ne assorbono, mentre quelle scure hanno un comportamento opposto.

Buona parte del riscaldamento che ha interessato il Circolo polare artico dagli anni ottanta a oggi può essere ricondotto a un meccanismo di amplificazione dovuto alla diminuzione dell'albedo, cioè la capacità riflettente, del manto nevoso e della banchisa: la neve fresca ha un'albedo maggiore del ghiaccio, che a sua volta ha un'albedo superiore a quello dell'acqua sottostante. Per capire a fondo le cause di questa riduzione, lo scienziato atmosferico Hailong Wang del Department of Energy degli Stati Uniti, e colleghi, hanno confrontato modelli climatici e di dispersione degli aerosol con osservazioni satellitari mensili della regione artica tra il 1982 e il 2014.

Nello studio, pubblicato sui «Proceedings of the National Academy of Sciences», i ricercatori evidenziano una riduzione media dell'albedo superficiale durante primavera ed estate di 1,25-1,51 per cento per decennio. L'aumento della temperatura dell'aria superficiale, associato al diradamento delle nevicate in favore delle piogge, è stato il principale fattore di contrazione della copertura nevosa nella regione.

A sua volta, essa sarebbe responsabile per circa il 70 per cento della diminuzione dell'albedo superficiale, mentre la riduzione della frazione di ghiaccio marino contribuirebbe alla restante parte. Sebbene la deposizione di aerosol scuri, come la fuliggine, sia stata spesso associata alla diminuzione della capacità riflettente, gli autori notano che è diminuita molto negli ultimi decenni, suggerendo che abbia un ruolo secondario nel promuovere la fusione del manto nevoso.

Davide Michielin

La tutela delle foreste alpine riduce il rischio idrogeologico

Le montagne stanno diventando sempre più antropizzate. Che effetto hanno queste «perturbazioni» alla copertura forestale sul rischio idrogeologico delle regioni alpine?
Se lo sono chiesti Julius Sebald, dell'Istituto di selvicoltura dell'Università di Vienna, e collaboratori in uno studio pubblicato su «Environmental Research Letters».
Nel caso di studio delle Alpi austriache, gli autori hanno considerato il periodo 1986-2016: analizzate le immagini del satellite statunitense Landsat per ottenere mappe di copertura forestale con la risoluzione spaziale di 30 metri, hanno classificato ben 3768 eventi di pericolo derivanti dai torrenti alpini, che hanno procurato 2646 inondazioni e 1122 frane e deflussi di detriti. Questi eventi dipendono da vari fattori, tra cui però anche lo stato di boschi e foreste.
I ricercatori hanno usato un modello statistico che mette in relazione le principali cause di dissesto con gli effetti osservati. Ebbene, un aumento della copertura forestale induce una diminuzione del rischio idrogeologico che viene dai torrenti austriaci e si è quantificato anche il vantaggio specifico rispetto ad altri fattori. La tutela dei boschi alpini, dunque, è uno degli strumenti migliori per adattare il territorio, fronteggiando così l'aumento delle precipitazioni violente.

Antonello Pasini

olli0815/iStock

FISIOLOGIA

Il cuore matto della balenottera

Il ritmo dei suoi battiti si spinge ai limiti fisiologici

eco2drew/iStock

Un gruppo di scienziati statunitensi ha misurato per la prima volta il ritmo cardiaco di una balenottera azzurra in mare aperto, scoprendo che il cuore di questi grossi cetacei, considerati i più grandi animali mai esistiti, si spinge fino ai limiti della sua fisiologia.

Usando elettrodi adagiati su ventose, Jeremy Goldbogen, biologo marino della Stanford University, e colleghi hanno dimostrato che, mentre gli esemplari di *Balaenoptera musculus* sono sott'acqua a caccia di krill, il loro cuore diminuisce gradualmente il numero di contrazioni, arrivando a battere anche solo due volte in un minuto. Il dato è risultato molto inferiore alle previsioni ricavate sulla base di studi precedenti, ma gli scienziati lo hanno ritenuto plausibile considerando che in questi mammiferi marini, come in altri animali, l'aorta può diventare molto elastica e trattenere una quantità aggiuntiva di sangue ossigenato fra un battito e l'altro. Nella risalita in superficie, una volta completato il pasto, il battito cardiaco torna ad aumentare per ripristinare i livelli di ossigeno precedenti all'immersione. Anche in questo caso i dati registrati hanno colto di sorpresa i ricercatori, che si aspettavano una frequenza massima inferiore a 40 battiti al minuto, il limite previsto tenuto conto della durata di una singola contrazione cardiaca.

Tuttavia, si legge su «Proceedings of the National Academy of Sciences», solo un ritmo così elevato è in grado di soddisfare il fabbisogno di ossigeno di un mammifero che pesa decine di tonnellate e che può immergersi per più di 16 minuti fino a una profondità di quasi 190 metri. In sostanza, hanno concluso Goldbogen e colleghi, potrebbe essere questa la ragione che ha impedito all'evoluzione di selezionare balene di dimensioni più grandi di quelle con cui oggi sono conosciute.

Sara Mohammad

Droni e intelligenza artificiale per i cetacei

Ricercatori del Brain Inspired Computer Lab di Intel e oceanografi dell'associazione statunitense Ocean's Alliance hanno messo a punto un sistema che unisce dati registrati da droni commerciali appositamente modificati e intelligenza artificiale, e che ha come obiettivo lo studio dello stato di salute delle popolazioni di balenottere azzurre e di megattere nell'Oceano Pacifico, al largo delle coste dell'Alaska.
I velivoli teleguidati vengono usati per due scopi: riconoscere i singoli esemplari con riprese dall'alto, che ne individuano i caratteri distintivi confrontandoli con quelli di una banca di immagini riprese nel tempo dai ricercatori; raccogliere su piastre di Petri, collocate a bordo dei droni, il condensato del soffio del cetaceo per poi analizzarlo in laboratorio. Proprio per questa seconda caratteristica i quadricotteri usati sono stati chiamati SnotBot, da *snot*, che in inglese significa «muco».
Inoltre, in collaborazione con ricercatori dell'Università dell'Alaska a Fairbanks e con scienziati dell'Institute of Advanced Studies di Aarhus, in Danimarca, il gruppo ha sviluppato un sistema, sempre basato sull'intelligenza artificiale, che unisce i dati registrati dai droni per determinare la massa corporea della balena e verificare la sua crescita e le sue condizioni nel tempo.

Riccardo Oldani

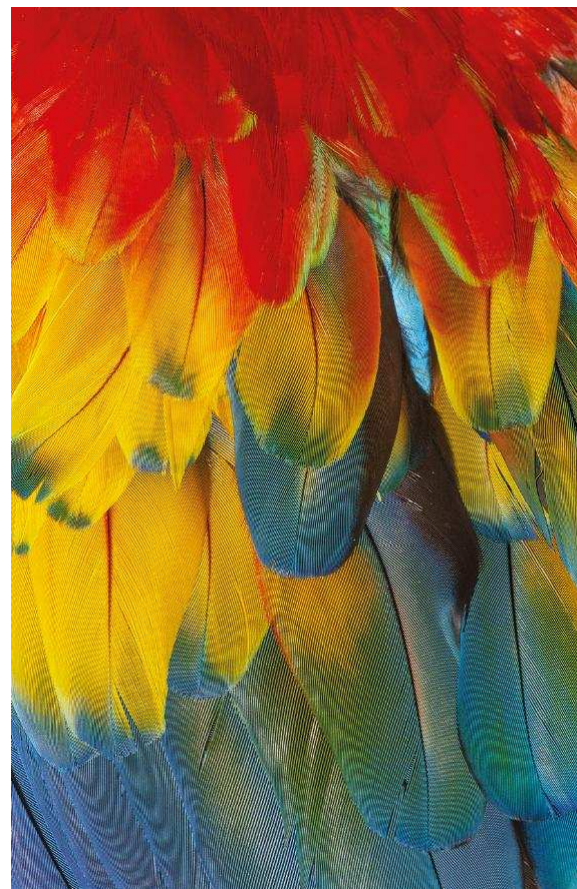
Approvato il primo vaccino, un'arma in più contro Ebola

Il primo vaccino al mondo contro Ebola è stato approvato da una grande agenzia regolatoria, l'Agenzia europea per i medicinali (o EMA, da European Medicines Agency). Il vaccino, prodotto da Merck e chiamato Ervebo, è stato sperimentato nel 2015 in Africa occidentale su chi era entrato a contatto con i malati e sui loro contatti, incluso quindi il personale sanitario, e ha offerto un'altissima protezione.
È stato poi usato in emergenza nelle epidemie del 2018 e del 2019 nella Repubblica democratica del Congo, sostenute dalla stessa specie del virus (detta Zaire).
Parecchi altri vaccini sono in fase di sperimentazione, alcuni prossimi all'approvazione, e gli studi continueranno anche su Ervebo, per capire per esempio quanto dura l'immunità. Si attendono inoltre prodotti più facili da conservare e attivi contro altre specie di Ebola.
Intanto proseguono anche le sperimentazioni dei farmaci e Lori Dodd, dei National Institutes of Health di Bethesda, avverte su «Science Translational Medicine» che non ci sono scorciatoie: l'analisi dei trial condotti mostra che per avere prove di efficacia solide servono i classici trial randomizzati e controllati; i protocolli semplificati che alcuni invocano non danno risultati convincenti. (*GiSa*)

Cento milioni di anni di evoluzione delle penne

Superficie portante nel volo, strato impermeabile durante le immersioni, intercapedine nel mantenere il calore corporeo: le penne sono il vero segreto del successo evolutivo degli uccelli.

Un ampio studio coordinato dal biologo molecolare Cheng-Ming Chuong dell'University of Southern California a Los Angeles, e pubblicato su «Cell», esamina con approccio multidisciplinare l'evoluzione della loro architettura. Dallo struzzo al colibrì passando per pinguino e rondine, gli autori della ricerca hanno analizzato e quindi confrontato le caratteristiche biofisiche e molecolari delle penne di 25 specie, compreso un reperto fossile conservato in ambra scoperta in Myanmar, nel Sudest asiatico.

Alla base della straordinaria varietà di queste complesse appendici cutanee vi è la loro struttura modulare che, inoltre, rende possibili diverse specializzazioni nel medesimo individuo. Le numerose barbe del vessillo si formano a partire da un unico strato di epitelio che si suddivide ripetutamente come in un foglio di carta inciso lungo linee parallele. Pur con alcune differenze, come l'assenza di uncini tra le barbe più sottili, l'analisi dei fossili ha confermato che negli ultimi 100 milioni di anni l'architettura di base delle penne è rimasta quasi inalterata. (*DaMi*)

La fine del pinguino imperatore?

Il ghiaccio si sta sciogliendo sotto le zampe del pinguino imperatore (*Aptenodytes forsteri*), che potrebbe estinguersi entro la fine del secolo. Colpa, manco a dirlo, del riscaldamento globale che si «mangia» i ghiacciai dell'Antartide su cui la specie si accoppia, depone le uova, fugge dai predatori. Il futuro della specie, si legge su «Global Change Biology», dipende dal limitare l'aumento della temperatura media della Terra a 1,5 °C rispetto ai livelli preindustriali (obiettivo già indicato dagli accordi di Parigi) entro il 2100. In questo caso, spiega la coordinatrice dello studio Stéphanie Jenouvrier, biologa allo statunitense Woods Hole Oceanographic Institution, i pinguini imperatore se la caverebbero con un 31 per cento di perdite.
La previsione è frutto di proiezioni elaborate tenendo conto di diversi scenari climatici, scioglimenti dei ghiacci e schemi migratori dei pinguini. Nella peggiore ma purtroppo concreta possibilità che le emissioni di gas serra continuino ai ritmi attuali, entro fine secolo l'80 per cento delle colonie sarà quasi estinta, cioè perderà il 90 per cento degli individui. Globalmente parliamo di un calo dell'81-86 per cento (dipende dagli spostamenti dei pinguini) rispetto al 2009. (*MaSa*)

clark42/iStock (*penne*); KeithSzafranski/iStock (*pinguini*)

Un'inclinazione comune per gli esopianeti

La Terra ha potuto godere di una lunga stabilità climatica anche grazie al fatto che l'inclinazione del suo asse di rotazione subisce solo lievi variazioni, oscillando fra 22,1 e 24,5 gradi in 41.000 anni. Per confronto, l'asse di rotazione di Marte oscilla fra 10 e 60 gradi ogni due milioni di anni.

Partendo da queste considerazioni, un gruppo di astronomi guidato da Billy Quarles, del Georgia Institute of Technology di Atlanta, negli Stati Uniti, ha elaborato un modello teorico per valutare l'evoluzione nel tempo dell'obliquità di un pianeta orbitante nella zona abitabile di un sistema binario.

Le simulazioni, impostate impiegando un pianeta gemello della Terra e variando parametri come masse stellari, distanza tra le stelle ed eccentricità dell'orbita, hanno evidenziato che, a seconda della massa della stella principale, quasi il 90 per cento dei pianeti potrebbe trovarsi in condizioni simili alla Terra, con lievi variazioni di obliquità, ed essere quindi più adatti a ospitare forme di vita complesse. A patto di non avere una luna: lo studio, pubblicato sull'«Astrophysical Journal», indica che, a differenza di quanto accade per la Terra, un eventuale satellite attorno al pianeta aumenterebbe l'instabilità dell'asse. (*EmRi*)

Le basi genetiche della diversità nei coleotteri

Quando chiesero al biologo John Haldane che cosa avesse imparato sul creatore dalla natura, questi rispose «il Signore ha una smodata passione per i coleotteri». Sono infatti il gruppo più vasto del regno animale: con 400.000 specie includono quasi metà delle specie descritte di insetti, e un quarto delle specie note di tutti gli animali. Per capire storia e ragioni di questa fioritura evolutiva, sui «Proceedings of the National Academy of Sciences» Duane D. McKenna dell'Università di Memphis e colleghi hanno analizzato 4818 geni per ciascuna di 521 specie di coleotteri.

I risultati mostrano che i coleotteri nascono circa 330 milioni di anni fa, nel Carbonifero, sopravvivendo a tre estinzioni di massa. Ma molte famiglie di coleotteri nascono nel Mesozoico, di pari passo con l'evoluzione delle piante con fiori. L'analisi genomica rivela che almeno due gruppi di coleotteri acquisirono in quel periodo geni da funghi e batteri, codificanti per enzimi capaci di digerire la parete cellulare delle piante. I coleotteri erbivori guadagnarono così un vantaggio essenziale nello sfruttare l'esplosione delle piante con fiori, che ha dato il via al loro imbattuto successo. Il trasferimento di geni tra organismi anche remoti sembra avere quindi un ruolo sempre più importante nell'evoluzione. (*MaSan*)

Mappato il rischio dovuto alle eruzioni dell'Etna

Per la popolazione intorno all'Etna, più che triplicata negli ultimi 150 anni, le colate di lava sono la minaccia maggiore. Ora ricercatori dell'Istituto nazionale di geofisica e vulcanologia di Catania, coordinati da Ciro del Negro, hanno creato una mappa di rischio ed esposizione delle eruzioni effusive, quelle che generano colate laviche. Nello studio, pubblicato sul «Geological Society of American Bulletin», il rischio è stato valutato con un sistema informativo usando tre fattori principali: probabilità dell'apertura di nuove bocche eruttive, eventi probabili associati alle eruzioni e sovrapposizione di percorsi di colate laviche. Il rischio è stato combinato con l'esposizione degli elementi in gioco, come popolazione, edifici e uso del territorio. La mappa risultante mostra che i livelli di rischio più elevati si hanno nella Valle del Bove e lungo le parti superiori delle fratture sud e nord-est del vulcano. Il maggiore livello di esposizione è stato rilevato sul versante orientale, dove ci sono i principali centri abitati. È qui che il rischio complessivo dovuto a eruzioni effusive da bocche laterali è il più alto. (*EnNi*)

Alberto Masnovo/iStock

Il raggio del protone è stato aggiornato

Un nuovo esperimento ha permesso ai fisici di aggiornare il valore del raggio del protone. La nuova misura, pari a 0,831 femtometri (1 femtometro vale un milionesimo di milionesimo di millimetro), riduce del cinque per cento il valore precedentemente accettato. Lo studio, pubblicato su «Nature», porta la firma del gruppo guidato da Weizhi Xiong, della statunitense Duke University, e presenta i risultati dell'esperimento PRad. La tecnica impiegata consiste nello studio della diffusione (*scattering*) di un fascio di elettroni lanciati contro nuclei atomici, in questo caso rappresentati da molecole di idrogeno. Una tecnica spettroscopica alternativa consiste invece nella misura di precisione dei livelli energetici dell'atomo di idrogeno. Fino al 2010, entrambe le tecniche producevano risultati coerenti. Tuttavia, un esperimento con atomi di idrogeno esotici, cioè con muoni al posto degli elettroni, più massicci e quindi in grado di produrre misurazioni molto più precise, aveva abbassato il valore del raggio del protone, tanto che alcuni fisici avevano ipotizzato una nuova fisica. L'esperimento PRad, assieme a un altro del 2018, riporta finalmente pace fra le varie misure ed esclude eventuali anomalie, risolvendo il problema sollevato dai muoni. (*EmRi*)

RAPPORTO SPECIALE

Dieci tecnologie innovative per il 2020

Soluzioni dai laboratori della scienza che potrebbero cambiare il mondo e le nostre abitudini

Illustrazioni di Vanessa Bianchi

Un giorno non lontano una delle tecnologie emergenti messe in evidenza in questo rapporto permetterà di teletrasportarsi virtualmente in un posto lontano e sentire davvero le strette di mano e gli abbracci di compagni di viaggio cibernetici. Prossimi a diventare comuni sono anche: robot umanoidi (e animaloidi) progettati per socializzare con le persone; un sistema per individuare in pochi secondi l'origine di epidemie di intossicazioni alimentari; minuscole lenti che apriranno la strada a macchine da presa miniaturizzate; plastiche robuste e biodegradabili che possono derivare da scarti vegetali altrimenti non utilizzabili; sistemi di archiviazione a base di DNA che conserveranno affidabilmente quantità gigantesche di informazioni; e altro ancora.
Insieme al World Economic Forum, «Scientific American» ha riunito un comitato direttivo internazionale formato da esperti di punta in campo tecnologico, che ha lavorato intensamente per individuare le «dieci tecnologie emergenti» presentate in questo articolo. Dopo aver chiesto segnalazioni ad altri esperti di ogni parte del mondo, il comitato ha valutato decine di proposte secondo alcuni criteri. Le tecnologie suggerite avrebbero il potenziale di apportare benefici a società ed economie? Potrebbero cambiare modalità consolidate di fare le cose? Sono ancora ai primi stadi di sviluppo ma attirano parecchi interessi di laboratori di ricerca, aziende o investitori? È probabile che nei prossimi anni facciamo progressi significativi? Il gruppo ha richiesto ulteriori informazioni, se necessario, e ha perfezionato la lista nel corso di quattro *meeting* virtuali. Speriamo che il risultato sia di vostro gradimento, i vostri commenti sono i benvenuti.

Mariette DiChristina e Bernard S. Meyerson

1

AMBIENTE

Bioplastiche per un'economia circolare

Solventi ed enzimi avanzati stanno trasformando gli scarti legnosi in plastiche biodegradabili migliorate

di Javier Garcia Martinez

La nostra civiltà è fondata sulla plastica. Solo nel 2018 ne sono stati prodotti 358 milioni di tonnellate, una quantità che secondo il World Economic Forum dovrebbe quasi triplicare entro il 2050. Eppure se ne ricicla meno del 15 per cento. La maggior parte di quella che resta è incenerita, riempie le discariche o è abbandonato nell'ambiente, dove può rimanere per secoli perché è resistente alla digestione microbica. I detriti di plastica che si accumulano negli oceani provocano ogni sorta di problemi, dalla morte degli animali selvatici che li ingeriscono per errore al rilascio di composti tossici. E possono anche entrare nei nostri corpi, tramite il pesce contaminato.
Le plastiche biodegradabili possono alleviare questi problemi, contribuendo a raggiungere il traguardo di un'economia circolare della plastica, in cui questi materiali derivano da biomasse e sono riconvertiti sempre in biomasse. Come le plastiche standard di origine petrolchimica, le versioni biodegradabili sono composte da polimeri (lunghe catene di molecole) che allo stato fluido possono essere plasmati in una varietà di forme. Tuttavia, le opzioni attualmente disponibili, in massima parte prodotte da mais, canna da zucchero oppure grassi di scarto e oli, mancano in genere della resistenza meccanica e delle caratteristiche visive delle tipologie standard. Recenti progressi nella produzione di plastiche da cellulosa o lignina (la materia secca delle piante) promettono di superare questi inconvenienti. Un vantaggio in più per l'ambiente è che cellulosa e lignina possono essere ottenute da piante non alimentari, come la canna domestica, coltivate su terreni marginali inadatti alle colture alimentari, oppure anche da scarti legnosi e sottoprodotti agricoli che altrimenti non servirebbero a nulla.
La cellulosa, il più abbondante polimero organico sulla Terra, è un componente fondamentale delle pareti cellulari delle piante; la lignina riempie gli spazi in quelle pareti, conferendo resistenza e rigidezza. Per produrre plastiche da queste due sostanze bisogna prima scomporle nei loro blocchi costituenti, o monomeri, e di recente alcuni scienziati hanno scoperto

come fare per entrambe. Il lavoro effettuato sulla lignina è particolarmente importante perché i monomeri della lignina sono composti da anelli aromatici, ovvero le strutture chimiche che danno resistenza meccanica e altri caratteristiche desiderabili alle plastiche standard. La maggior parte dei solventi non dissolve la lignina, alcuni ricercatori tuttavia hanno dimostrato che certi liquidi ionici (cioè composti in larga parte da ioni) a basso impatto ambientale riescono a separarla selettivamente dal legno e dalle piante legnose. A quel punto, enzimi ottenuti grazie all'ingegneria genetica e simili a enzimi di funghi e batteri sono in grado di scomporre la lignina disciolta nei suoi componenti.

Alcune aziende si basano su questi risultati. Per esempio Chrysalis Technologies, *spin-off* dell'Imperial College di Londra, ha sviluppato un processo che usa liquidi ionici a basso costo per separare la cellulosa dalla lignina presenti nei materiali di partenza. Un'azienda biotecnologica finlandese, MetGen Oy, produce diversi enzimi geneticamente ingegnerizzati che degradano lignine di origini differenti in componenti utili per una vasta gamma di applicazioni. E Mobius (già Grow Bioplastics) sta sviluppando pellet di plastica a base di lignina da usare per vasi da fiori biodegradabili, pacciame agricolo e altri prodotti.

Ci sono molti ostacoli da superare prima che le nuove plastiche possano essere usate su larga scala. Uno è il costo. Un altro ostacolo è ridurre al minimo la quantità di terreno e di acqua da usare per produrle: anche se la lignina provenisse solo da prodotti di scarto, per convertirla in plastica ci sarebbe bisogno di acqua. Come per ogni grande sfida, le soluzioni richiederanno una combinazione di misure, dalle normative a cambiamenti volontari nei modi in cui la società usa e smaltisce la plastica.

In ogni modo, i metodi emergenti per la produzione di plastiche biodegradabili offrono un perfetto esempio di come solventi più «verdi» e biocatalizzatori più efficaci possano contribuire a generare un'economia circolare in un settore industriale di primo piano.

Hanno contribuito, come membri del comitato direttivo sulle tecnologie emergenti

Mariette DiChristina, già *editor in chief* di «Scientific American», è preside del College of Communication dell'Università di Boston.

Bernard S. Meyerson, vicepresidente del comitato direttivo ed ex-responsabile per l'innovazione di IBM, è socio della U.S. National Academy of Enginering e ha ricevuto numerosi premi in fisica, ingegneria e *management*. Dal 2014 al 2016 ha presieduto il Meta-Council on Emerging Technologies e dal 2016 al 2018 il Global Future Council on Advanced Materials del Word Economic Forum (WEF). È impegnato in diverse iniziative del WEF, come quelle sul futuro dell'industria manifatturiera negli Stati Uniti e sull'innovazione finalizzata a tecnologie per i sistemi alimentari.

Jeff Carbeck, fondatore di varie aziende, è CEO di 10EQS, che riunisce consulenti e specialisti settoriali di alto profilo per favorire crescita e prestazioni delle organizzazioni. Ha fatto parte del Global Future Council on Advanced Materials del Word Economic Forum (2016-2018); un'azienda di cui è stato co-fondatore, MC10, è World Economic Forum Technology Pioneer.

Rona Chandrawati è *senior lecturer* e responsabile del Nanotechnology for Food and Medicine Laboratory dell'Università del New South Wales (UNSW Sidney) in Australia. Le sue ricerche riguardano lo sviluppo di nanosensori colorimetrici per diagnosi mediche, sicurezza alimentare e monitoraggio ambientale. È stata Young Scientist del World Economic Forum nel 2018 e fa parte dell'Expert network del Forum. È stata nel Global Future Council on Biotechnology (2018-2019) del WEF.

Seth Fletcher è *chief features editor* di «Scientific American». È autore di *L'ombra di Einstein* (Bollati Boringhieri, 2019).

Javier Garcia Martinez è professore di chimica inorganica e direttore del Laboratorio di nanotecnologie molecolari dell'Università di Alicante in Spagna. È fra i fondatori di Rive Technology, fa parte del Comitato esecutivo dell'Unione internazionale di chimica pura e applicata, è Young Global Leader e membro dell'Expert Network del World Economic Forum. Ha pubblicato molti lavori su nano-materiali, catalisi ed energia. Fra i suoi libri: *Nanotechnology for the Energy Challenge* e *The Chemical Element: Chemistry's Contribution to Our Global Future*.

Hiroaki Kitano, esperto di intelligenza artificiale e biologia dei sistemi, è presidente e CEO dei Sony Computer Science Laboratories e dirige il System Biology Institute, entrambi a Tokyo. Ha fatto parte di vari Global Future Council del World Economic Forum; fra cui, ultimamente (2016-2019), l'Artificial Intelligence and Robotics Council.

Corinna E. Lathan è co-fondatrice e CEO di AnthroTronix, azienda di ricerca e sviluppo in ingegneria biomedica che realizza prodotti come dispositivi digitali per la salute, tecnologia *wearable*, robotica e realtà aumentata. È nel consiglio di amministrazione di PTC, *provider* di «Internet delle cose» e piattaforme di realtà aumentata. È stata inoltre nominata Young Global Leader e Technology Pioneer dal World Economic Forum, ha presieduto il Global Future Council on Human Enhancement del Forum dal 2016a al 2018, e fa parte del Global Future Council on Healthy Longevity and Human Enhancement.

Geoffrey Ling, ex-colonnello dell'Esercito degli Stati Uniti, insegna neurologia all'Uniformed Services University of Health Sciences. È inoltre vicedirettore *ad interim* per la ricerca nelle neuroscienze dell'Inova Fairfax Medical Center e partner di Ling and Associates. Esperto di sviluppo e transizione all'uso commerciale delle tecnologie, ha ricoperto posizioni di vertice alla Defense Advanced Research Projects Agency e, sotto la presidenza di Barak Obama, nell'Office of Science, Technology and Policy della Casa Bianca. Ha fatto parte del Council on Neurotechnologies del World Economic Forum (2016-2018).

Andrew Maynard è direttore del Risk Innovation Lab all'Arizona State University e autore del libro *Films from the Future: The Technology and Morality of Sci-Fi Movies*. Il suo lavoro è centrato su sviluppo e uso responsabile delle tecnologie emergenti. Attualmente fa parte del Global Future Council on Agile Governance del World Economic Forum.

Elizabeth O'Day è CEO e fondatrice di Olaris Therapeutics, azienda dedicata alla medicina di precisione di Cambridge, in Massachusetts, e co-presiede il Global Future Council on Biotechnologies del World Economic Forum. È inoltre la fondatrice di Lizzard Fashion, Proyecto Chispa, Women in Science and Technology e PhiSB.

Sang Yup Lee, co-presidente 2016-2018 del Global Future Council on Biotechnologies del World Economic Forum, è *distinguished professor* di ingegneria biochimica e biomolecolare al Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), e preside dei KAIST Institutes. È proprietario di oltre 680 brevetti.

AUTORI OSPITI

Mark Fischetti, *senior editor* di «Scientific American», si occupa di tutti gli aspetti della sostenibilità.

Alberto Moscatelli è *senior editor* di «Nature biotechnologies», dove segue studi che trattano di nanofotonica e altri campi. Ha conseguito il PhD in fotochimica alla Columbia University.

Andrea Thompson, *associate editor* di «Scientific American», si occupa di sostenibilità.

INGEGNERIA

Robot sociali

Amici e assistenti robotici stanno entrando in modo profondo nelle nostre vite

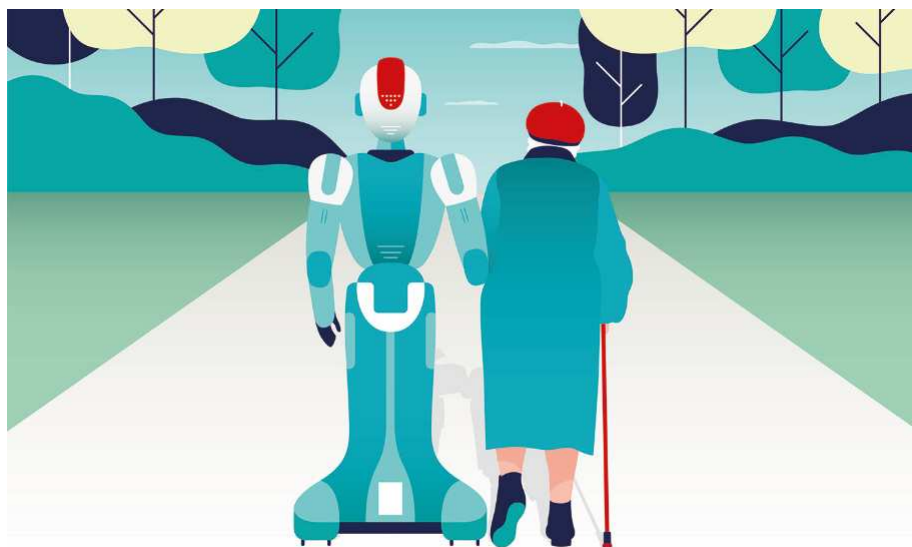
di Corinna E. Lathan e Geoffrey Ling

Tanti nell'industria quanto in medicina, i robot abitualmente costruiscono, smontano e ispezionano cose; danno anche assistenza in chirurgia e distribuiscono farmaci su ricetta. Né questi robot né quelli «sociali» – progettati per interagire con le persone e suscitare una connessione emotiva – si comportano come Rosie, la cameriera dei Jetson, la famiglia del cartone animato *I pronipoti*, o come altri amati droidi di storie di fantasia. Eppure, c'è da aspettarsi che nel giro di qualche anno i robot sociali diventeranno più sofisticati e più diffusi. Il settore sembra arrivato a un punto critico: i robot sono capaci di interagire ed eseguire compiti utili come mai prima d'ora.

Come la maggior parte dei robot, i robot sociali usano l'intelligenza artificiale per decidere come agire in risposta alle informazioni che ricevono tramite fotocamere e altri sensori. La capacità di reagire in modi realistici prende forma da ricerche su come si formano le percezioni, su che cosa costituisce l'intelligenza sociale ed emotiva, su come le persone possono dedurre pensieri e sentimenti degli altri. I progressi dell'intelligenza artificiale hanno permesso ai progettisti di tradurre conoscenze di psicologia e neuroscienze in algoritmi che permettono ai robot di riconoscere voci, volti ed emozioni; di interpretare il discorso e i gesti e di rispondere appropriatamente a complessi segnali verbali e non; di cercare il contatto visivo, fare conversazione e adattarsi ai bisogni delle persone imparando dalle loro reazioni, conferme e critiche.

Come conseguenza di tutto questo, i robot sociali ricoprono una varietà di ruoli sempre più ampia. Per esempio, un umanoide alto 1,2 metri chiamato Pepper, di SoftBank Robotics, riconosce volti ed emozioni umane di base, e conversa grazie allo schermo *touch* che ha sul «petto». In tutto il mondo, circa 15.000 Pepper svolgono servizi come *check-in* negli alberghi, servizio clienti negli aeroporti, assistenza per acquisti e servizio cassa nei *fast-food*. Temi, di Temi USA, e Loomo, di Segway Robotics, sono la prossima generazione di assistenti personali: sono simili ad Amazon Echo e Google Home, ma si muovono e possono fornire un nuovo livello di funzionalità. Loomo, per esempio, non è solo un compagno ma può trasformarsi a comando in uno scooter per il trasporto.

Particolarmente attraente è la possibilità di usare i robot sociali nell'assistenza alla popolazione anziana del mondo, che cresce sempre di più. Il PARO Therapeutic Robot, sviluppato dal National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST) del Giappone, che somiglia a un cucciolo di foca da coccolare, è pensato per fornire stimoli e ridurre lo stress a persone con Alzheimer e altri ospiti di strutture assistenziali: risponde al proprio nome muovendo la testa e piagnucola per chiedere coccole. Mabu, di Catalia Health, interagisce con i pazienti, specialmente se anziani, come assistente per la qualità della vita, ricordando loro di fare passeggiate, prendere farmaci e telefonare ai membri della famiglia. I robot sociali iniziano ad affermarsi anche come giocattoli. I primi tentativi di incorporare il comportamento sociale in giocattoli, come il Baby Alive di Hasbro e il cane robotico AIBO di Sony, hanno avuto un successo limitato. Ora però tornano entrambi alla carica, e la versione più recente di AIBO ha sofisticate capacità di riconoscimento vocale e gestuale, gli si possono insegnare giochetti e sviluppa nuovi comportamenti in base alle interazioni precedenti.

Nel 2018 le vendite globali di robot per consumatori sono state stimate in 5,6 miliardi di dollari e il mercato è previsto in crescita fino a 19 miliardi nel 2025, con più di 65 milioni di robot venduti all'anno. Questo andamento potrebbe sembrare sorprendente, dato che numerose aziende ben finanziate che proponevano robot ai consumatori, come Jibo e Anki, sono fallite. C'è però una nuova ondata di robot che si prepara a prendere il posto dei defunti, come BUDDY, di Blue Frog Robotics, un dispositivo mobile con grandi occhi spalancati con cui si può giocare, ma che può essere impiegato anche come assistente personale e per l'automazione e la sicurezza delle abitazioni.

INGEGNERIA

Lenti minuscole per dispositivi miniaturizzati

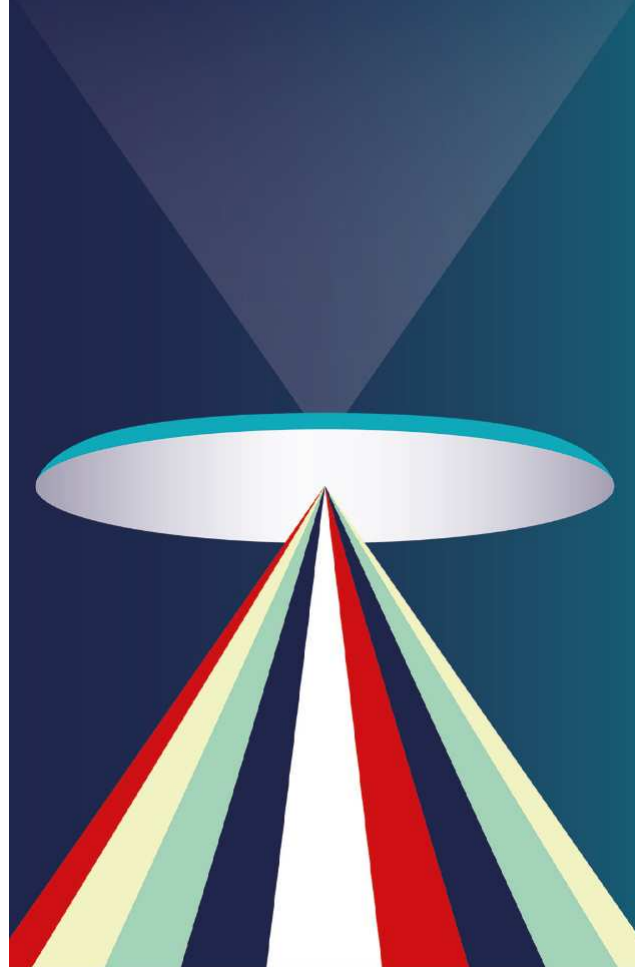
Per controllare la luce in base alle nostre necessità potremo sfruttare metalenti sottili e piatte al posto di quelle voluminose di vetro

di Alberto Moscatelli

Telefoni, computer e altri dispositivi elettronici sono diventati sempre più piccoli, ma i loro componenti ottici si sono ostinatamente rifiutati di farlo. Con le tradizionali tecniche per tagliare e piegare il vetro è difficile fabbricare lenti molto piccole, e spesso gli elementi in una lente di vetro devono essere messi uno sopra l'altro per focalizzare la luce in modo adeguato.

Di recente gli ingegneri sono riusciti a capire gran parte della fisica alla base di alternative più piccole e leggere, chiamate metalenti. Queste lenti potrebbero permettere una miniaturizzazione molto più spinta di microscopi e altri strumenti di laboratorio, e anche di prodotti di consumo come macchine fotografiche, visori per la realtà virtuale e sensori ottici per l'Internet delle cose. Inoltre potrebbero migliorare la funzionalità delle fibre ottiche.

Una metalente è una superficie piana, con uno spessore inferiore al micrometro, coperta da una schiera di oggetti alla nanoscala, come sporgenze o fori. Quando la luce incidente colpisce questi elementi, cambiano molte sue proprietà, come polarizzazione, intensità, fase e direzione di propagazione. È possibile disporre con precisione gli oggetti alla nanoscala per fare in modo che la luce in uscita dalla metalente abbia le caratteristiche desiderate. Inoltre le metalenti sono così sottili che se ne possono impilare parecchie una sull'altra senza un incremento significativo delle dimensioni. I ricercatori hanno dimostrato la funzionalità di dispositivi ottici come spettrometri e polarimetri realizzati con queste superfici piane impilate.

Un importante passo in avanti c'è stato nel 2018, quando alcuni ricercatori hanno risolto il problema dell'aberrazione cromatica. Quando la luce bianca attraversa una lente, i suoi raggi con lunghezze d'onda diverse sono deflessi secondo angoli diversi, e quindi si focalizzano a distanze differenti tra loro rispetto alla lente: per compensare questo effetto oggi bisogna allineare più lenti con grande precisione. Invece un'unica metalente è in grado di focalizzare tutte le lunghezze d'onda della luce bianca nello stesso punto. Oltre a questa metalente «acromatica», gli scienziati ne hanno sviluppate altre che correggono aberrazioni di tipo diverso, per esempio coma e astigmatismo, che causano distorsioni e perdita di nitidezza nelle immagini.

Oltre a ridurne le dimensioni, le metalenti potrebbero abbassare il costo dei componenti ottici perché queste piccole lenti possono essere fabbricate con gli stessi macchinari già usati nell'industria dei semiconduttori. Quest'ultima caratteristica prospetta la possibilità di fabbricare, per esempio, i componenti ottici e quelli elettronici di un minuscolo sensore di luminosità l'uno accanto all'altro.

Per ora, però, il costo di produzione è ancora elevato, perché è difficile disporre con precisione gli elementi alla nanoscala su chip alla scala dei centimetri. Inoltre è necessario affrontare anche altre limitazioni. Per ora le metalenti non trasmettono la luce con la stessa efficienza delle lenti tradizionali, una capacità importante in applicazioni come le immagini a pieni colori.

In più, le metalenti sono troppo piccole per catturare grandi quantità di luce, il che vuol dire che almeno per il momento non sono adatte per scattare fotografie di alta qualità.

Nonostante tutto questo, però, probabilmente nel giro di qualche anno queste minuscole lenti si faranno strada in sensori più piccoli e più facili da fabbricare, in strumenti diagnostici come quelli per l'endoscopia e nelle fibre ottiche. Queste potenziali applicazioni sono abbastanza attraenti da aver ottenuto l'appoggio di enti pubblici e di aziende come Samsung e Google. Almeno una *start-up*, Metalenz, si aspetta di mettere le metalenti sul mercato nel giro di qualche anno.

4

MEDICINA E BIOTECNOLOGIE

Proteine disordinate come bersaglio di farmaci

Nuove strategie per trattare tumori e altre malattie

di Elizabeth O'Day

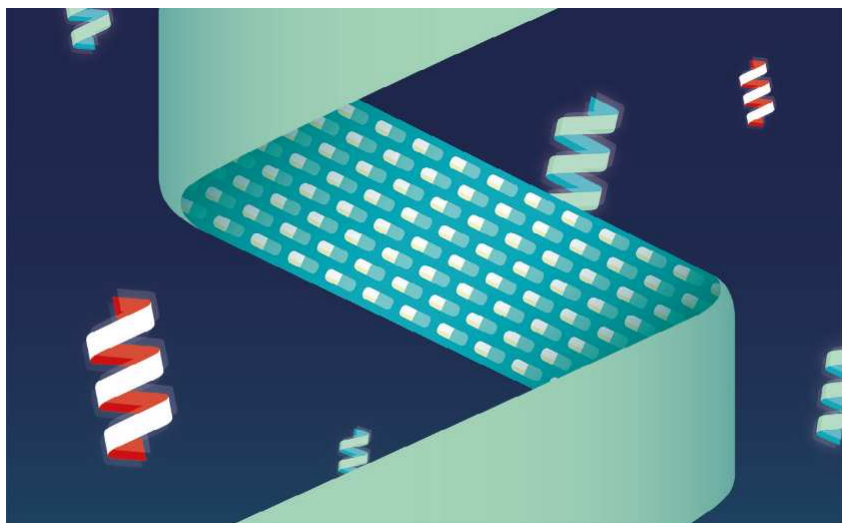
Decine di anni fa gli scienziati hanno identificato una particolare classe di proteine che possono causare varie malattie, dal cancro alle patologie degenerative. Queste «proteine intrinsecamente disordinate» (o IDP, da *intrinsically disordered protein*) avevano un aspetto diverso da quello delle proteine con strutture rigide che erano più familiari nelle cellule. Le strutture delle IDP erano mutevoli, e apparivano come insiemi di componenti che cambiavano costantemente configurazione. Si è scoperto che questa struttura allentata e flessibile permette alle IDP di raggruppare un'ampia varietà di molecole in momenti critici, come durante la risposta di una cellula allo stress. Le proteine meno flessibili hanno un numero più limitato di partner di legame. Quando le IDP non funzionano correttamente, possono emergere malattie.

Gli scienziati però non sono riusciti a mettere a punto trattamenti per eliminare o regolare IDP che non funzionano in modo corretto. Anzi, molte sono state definite *undruggable*, ovvero è impossibile colpirle con farmaci. Il motivo è che la maggior parte delle medicine usate oggi richiede una struttura stabile da bersagliare e le IDP non restano ferme abbastanza a lungo. Note proteine disordinate che possono contribuire al cancro – come c-Myc, p53 e K-RAS – si sono dimostrate troppo elusive. Ma questo quadro comincia a cambiare.

Ora gli scienziati usano combinazioni rigorose di biofisica, potenza di calcolo e una conoscenza migliore del funzionamento delle IDP per identificare composti capaci inibire queste proteine, e alcuni di questi composti sono diventati candidati per farmaci. Nel 2017 in Francia e Spagna alcuni ricercatori hanno dimostrato che è possibile mirare e colpire l'interfaccia indistinta di una proteina IDP. Hanno mostrato che un farmaco già approvato dalla statunitense Food and Drug Administration, trifluoperazina (usata per disturbi psicotici e ansia), si lega a NUPR1, una proteina disordinata coinvolta in una forma di cancro del pancreas, e la inibisce. Screening su vasta scala per la valutazione delle potenzialità terapeutiche di migliaia di possibili farmaci ne hanno rivelati diversi che inibiscono c-Myc, e alcuni stanno passando allo sviluppo clinico. Sono state identificate altre molecole che funzionano su altre IDP, come la proteina beta-amiloide implicata in malattie come l'Alzheimer.

La lista continua ad allungarsi, specialmente mentre diventa più chiaro il ruolo svolto dalle IDP in parti cruciali della cellula note come organelli (od organuli) senza membrana. In momenti specifici, questi organelli avvicinano tra loro molecole cellulari vitali, come proteine e RNA, tenendone invece separate altre. Questa prossimità permette che certe reazioni avvengano più facilmente, mentre la separazione ne impedisce altre.

Gli scienziati hanno progettato nuovi e potenti strumenti di manipolazione molecolare, denominati Corelets e CasDrop, che permettono di controllare come si formano gli organelli. Con questi e altri strumenti, i ricercatori hanno imparato che le IDP possono contribuire a controllare assemblaggio, funzionamento e scomposizione degli organelli.

La scoperta è importante perché durante la formazione e la degradazione degli organelli le IDP interagiscono con vari partner di legame, e nel farlo a volte mantengono per qualche istante una nuova forma. Potrebbe essere più facile trovare un farmaco che si leghi a questa nuova forma che trovare composti

che colpiscano la proteina nelle sue altre forme. Ricercatori in tutto il mondo cercano di svelare questi meccanismi.

Anche l'industria scommette sul potenziale terapeutico delle IDP. Un'azienda biotecnologica, IDP Pharma, sta sviluppando un tipo di inibitore con cui trattare mieloma multiplo e carcinoma polmonare a piccole cellule. Graffinity Pharmaceuticals, oggi parte di NovAlix, ha identificato piccole molecole per colpire la proteina disordinata tau, coinvolta nell'Alzheimer. Cantabio Pharmaceuticals cerca piccole molecole con cui stabilizzare le IDP coinvolte nei processi neurodegenerativi. E una nuova società, Dewpoint Therapeutics, esplora l'idea che gli organelli e i loro componenti disordinati, per come avvicinano le molecole tra loro per rafforzarne le reazioni, possano essere bersagli per farmaci. È sempre più probabile che nei prossimi 3-5 anni queste proteine un tempo intrattabili finiscano nel mirino dello sviluppo farmaceutico.

AMBIENTE

Fertilizzanti intelligenti per ridurre le contaminazioni

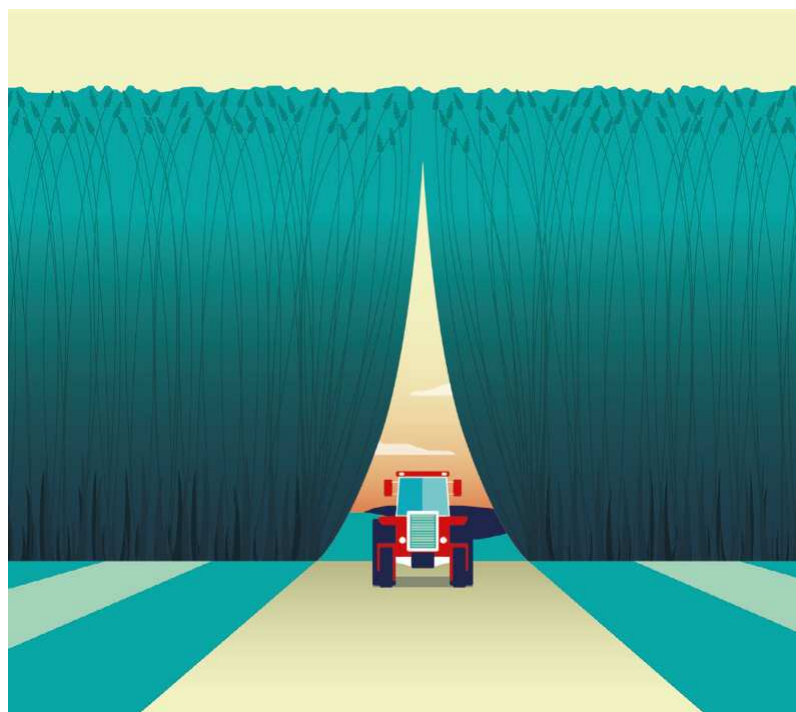
Formulazioni innovative rilasciano i nutrienti in base a esigenze specifiche

di Jeff Carbeck

Per nutrire la crescente popolazione mondiale, gli agricoltori devono aumentare le rese delle colture. Applicare più fertilizzanti può servire. Ma le versioni standard sono inefficienti, e spesso danneggiano l'ambiente. Per fortuna sono disponibili prodotti ecologicamente più validi, i fertilizzanti a rilascio controllato, e sempre più «intelligenti».

Tipicamente gli agricoltori concimano le colture in due modi. Spruzzano sui campi ammoniaca, urea e altre sostanze che producono azoto quando reagiscono con l'acqua. E applicano granuli di potassa o altri minerali per produrre fosforo, sempre per reazione con l'acqua. Ma solo una quantità relativamente piccola di questi nutrienti arriva fino alle piante. Gran parte dell'azoto finisce invece in atmosfera sotto forma di gas serra, e il fosforo finisce nei bacini idrografici, innescando frequenti episodi di crescita eccessiva di alghe e altri organismi. Al contrario, le formulazioni a rilascio controllato possono assicurare che livelli significativamente più alti di nutrienti raggiungano le colture, portando a rese più alte con meno fertilizzanti.

Già da un po' di tempo è in vendita una classe di fertilizzanti detti «a rilascio lento». Queste formulazioni consistono tipicamente in piccole capsule riempite di sostanze che contengono azoto, fosforo e altri nutrienti desiderati. Il guscio esterno rallenta sia il tasso di accesso dell'acqua al contenuto interno per liberare i nutrienti sia il tasso di uscita dei prodotti finali dalla capsula. Il risultato è che i nutrienti sono distribuiti gradualmente invece di essere rilasciati rapidamente e quindi non essere assorbiti con efficienza. Nuove formulazioni includono sostanze che rallentano ancora di più il rilascio di nutrienti, ritardando la conversione dei materiali di partenza, come l'urea, in nutrienti.

Di recente sono stati sviluppati fertilizzanti che aderiscono più pienamente alla descrizione di «rilascio controllato», resi possibili da materiali e tecniche di produzione sofisticati con cui calibrare i gusci e cambiare così i tassi di rilascio dei nutrienti nei modi desiderati al variare di temperatura, acidità o umidità del suolo. Combinando vari tipi di capsule calibrate in modo specifico, è possibile produrre fertilizzanti su misura per le esigenze di specifiche colture o condizioni di crescita. Aziende come Haifa Group e ICL Specialty Fertilizers sono fra quelle che offrono un controllo più preciso. Per esempio Haifa Group collega il tasso di rilascio dei nutrienti solo alla temperatura; quando la temperatura aumenta, il tasso di crescita delle colture e quello di emissione di nutrienti aumentano insieme.

Anche se le tecnologie di rilascio controllato rendono i più efficienti fertilizzanti, non eliminano tutti i lati negativi del loro impiego. I prodotti continuano a contenere ammoniaca, urea e potassa, per esempio; la produzione di queste sostanze è ad alta intensità energetica, dunque la loro produzione può contribuire alle emissioni di gas serra e al cambiamento climatico. Questo effetto potrebbe però essere mitigato usando fonti di azoto più rispettose dell'ambiente e incorporando microrganismi che aumentano l'efficienza dell'assorbimento di azoto e di fosforo da parte delle piante. Non ci sono prove che i materiali dei gusci danneggino l'ambiente, ma questo rischio va monitorato ogni volta che si introducono nuove sostanze in grandi quantità.

I fertilizzanti a rilascio controllato sono parte di un approccio sostenibile all'agricoltura chiamato «agricoltura di precisione». Questo approccio migliora le rese e riduce l'eccessivo rilascio di nutrienti nell'ambiente combinando tecniche di analisi dei dati, intelligenza artificiale e sistemi di sensori per determinare esattamente le quantità di fertilizzanti e di acqua richieste dalle piante in ogni momento, e impiegando veicoli autonomi per fornire i nutrienti nelle quantità e nei punti prescritti. L'installazione di sistemi di precisione però è costosa, quindi tendono ad averli solo progetti a grande scala. Al confronto, i fertilizzanti a rilascio controllato avanzati sono relativamente economici e potrebbero diventare una tecnologia di prima linea che aiuti gli agricoltori ad aumentare sostenibilmente la produzione dei raccolti.

INFORMATICA

Collaborare in telepresenza

I partecipanti alle riunioni virtuali avranno la sensazione di trovarsi fisicamente insieme

di Corinna E. Lathan e Andrew Maynard

Immaginate un gruppo di persone in diverse parti del mondo interagire senza problemi come se fossero fisicamente insieme, fino a poter sentire il tocco l'una dell'altra. I componenti che permetteranno questa sorta di «telepresenza collaborativa» potrebbero trasformare il nostro modo di lavorare e divertirci insieme, rendendo irrilevante la posizione fisica.

Come le *app* per videochiamate, tipo Skype e FaceTime, che hanno reso largamente accessibile quello che una volta era di dominio del mondo degli affari, e i giochi *on line* multigiocatore di massa, che hanno modificato radicalmente come interagiscono le persone su Internet, la telepresenza collaborativa potrebbe trasformare il modo in cui le persone interagiscono virtualmente negli affari e anche oltre. Il personale medico, per esempio, potrà lavorare in remoto con i pazienti come se si trovassero nella stessa stanza. E amici e famiglie potranno vivere esperienze condivise, come ritrovarsi in una stanza accogliente o visitare insieme una nuova città, senza in realtà trovarsi nello stesso posto.

Questa prospettiva è stata resa possibile da progressi in ambiti diversi. Le tecnologie per la realtà aumentata e per la realtà virtuale stanno diventando abbastanza capaci e accessibili per un'adozione su larga scala. Le aziende telefoniche stanno mettendo in campo reti 5G abbastanza veloci da poter gestire grandi masse di dati provenienti da schiere di sensori avanzati senza tempi di latenza. Alcuni innovatori stanno perfezionando

SALUTE PUBBLICA

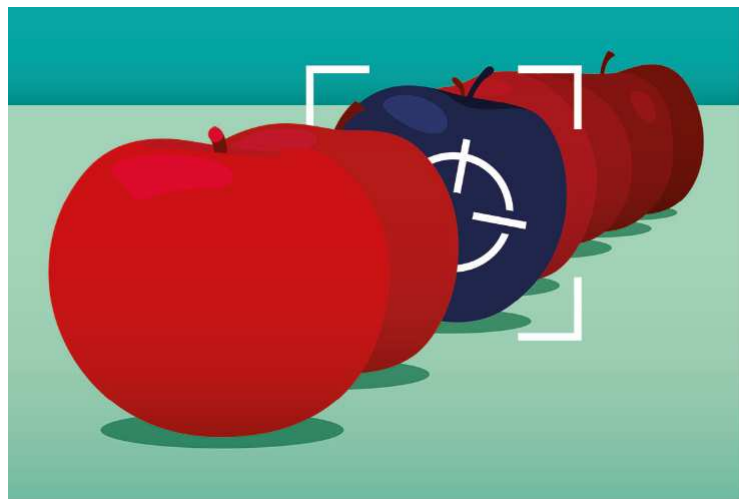
Sistemi avanzati per tracciamento e confezionamento del cibo

Una combinazione di due tecnologie può migliorare notevolmente la sicurezza alimentare

di Rona Chandrawati e Bernard S. Meyerson

Secondo l'Organizzazione mondiale della Sanità, ogni anno circa 600 milioni di persone soffrono di avvelenamenti da cibo e 420.000 ne muoiono. Quando si verifica un'epidemia di intossicazioni alimentari possono volerci giorni o settimane per rintracciare la fonte. Nel frattempo possono sentirsi male altre persone, e possono essere gettati via grandi quantitativi di alimenti non contaminati insieme ai prodotti dannosi. La ricerca delle fonti può andare a rilento, perché il percorso che porta il cibo dalle aziende agricole alla tavola è complicato, e le informazioni sui suoi spostamenti si trovano in sistemi locali che spesso non comunicano fra loro.

Una coppia di tecnologie potrebbe ridurre sia il numero di avvelenamenti sia lo spreco di cibo. La prima, un'innovativa applicazione della tecnologia *blockchain* (più nota per la gestione delle valute virtuali), inizia a risolvere il problema della tracciabilità. Nel frattempo, un miglioramento delle tecniche di confezionamento potrebbe offrire nuovi modi per determinare se il cibo è stato tenuto alla temperatura giusta e se abbia cominciato a guastarsi.

Blockchain è un sistema di contabilità decentrato in cui le singole voci sono inserite in sequenza in tanti «libri mastri» identici memorizzati in computer in molte sedi differenti. Questa ridondanza rende futile ogni manipolazione dei singoli libri mastri e genera una registrazione estremamente affidabile

delle transazioni. Attualmente una piattaforma *cloud* basata su blockchain sviluppata per il settore alimentare, IBM Food Trust, è usata da grossi rivenditori (uno di noi, Meyerson, è affiliato a IBM).

Integrando agricoltori, distributori e rivenditori al dettaglio in una stessa blockchain, Food Trust produce una registrazione

tecnologie che permettono alle persone di interagire fisicamente con ambienti remoti, anche con sensori «aptici» che permettono di avvertire quello che toccano i loro *avatar* robotici. L'immersione sensoriale totale prevista dalla telepresenza collaborativa richiederà tempi di ritardo notevolmente più piccoli di quelli accettabili per le videochiamate – e che a volte potrebbero mettere in difficoltà anche le reti 5G – ma algoritmi predittivi da intelligenza artificiale potrebbero evitare la percezione di tempi di latenza da parte degli utenti.
Sebbene la telepresenza collaborativa sia ancora un settore emergente, tutti i tasselli sono al loro posto affinché cominci a cambiare radicalmente le cose nel giro dei prossimi 3-5 anni. Per esempio, Microsoft e altre aziende già investono in tecnologie che si ritiene saranno alla base di un'industria da diversi miliardi di dollari entro il 2025. E la XPRIZE Foundation ha lanciato il concorso ANA Avatar XPRIZE (sponsorizzato da Nippon Airways) da 10 milioni di dollari per lanciare tecnologie che «trasporteranno in tempo reale sensi, azione e presenza umani in luoghi remoti, portando a un mondo più connesso». Mentre i vari pezzi vengono messi insieme, ci aspettiamo di vedere cambiamenti nella vita quotidiana e nel lavoro non meno spettacolari di quelli innescati dall'adozione di massa degli *smartphone*.

affidabile di un dato percorso degli alimenti lungo tutta la catena di distribuzione. In un test di questa tecnologia, Walmart ha rintracciato l'origine di una partita «contaminata» nel giro di qualche secondo; con la combinazione standard di dati scritti e digitali ci sarebbero voluti giorni. Con queste capacità, rivenditori al dettaglio e ristoranti possono togliere dalla circolazione un alimento contaminato in modo praticamente immediato e distruggere solo le partite provenienti dalla stessa fonte (un particolare coltivatore di lattuga, per esempio), senza dover eliminare intere derrate dai magazzini di tutto il paese. Molti giganti del settore alimentare – Walmart, Carrefour, Sam's Club, Albertsons Companies, Smithfield Foods, BeefChain, Wakefern Food (casa madre di ShopRite) e Topco Associates (gruppi d'acquisto) – hanno aderito a IBM Food Trust. Anche altre organizzazioni hanno introdotto tecnologie blockchain per migliorare la tracciabilità.
Nel frattempo, per prevenire fin dall'inizio gli avvelenamenti alimentari, laboratori di ricerca e aziende stanno sviluppando sensori miniaturizzati in grado di monitorare qualità e sicurezza di alimenti in banchi, cassette o confezioni singole. Per esempio Tomestrip UK e Vitsab International hanno realizzato indipendentemente etichette con sensori che cambiano colore se un prodotto è stato esposto a temperature superiori a quella raccomandata, e Insignia Technologies vende un sensore che cambia lentamente colore dopo che una confezione è stata aperta e indica quando arriva il momento di gettare il cibo rimasto. Per inciso, il colore cambia più in fretta se il prodotto non è conservato alla giusta temperatura. Inoltre sono in via di sviluppo sensori che rivelano i sottoprodotti gassosi sviluppati dal cibo deteriorato. Oltre a prevenire gli avvelenamenti, i sensori di questo tipo possono servire a ridurre gli sprechi indicando fino quando i cibi sono ancora commestibili.
Il costo rimane un grande ostacolo all'uso diffuso dei sensori. Tuttavia, l'esigenza di garantire la sicurezza degli alimenti e di limitare gli sprechi sta sostenendo l'avanzamento di questa tecnologia e di quelle basate su blockchain.

ENERGIA

Reattori nucleari più sicuri

Combustibili resilienti e reattori innovativi potrebbero favorire il ritorno dell'energia nucleare

di Mark Fischetti

Tenere sotto controllo l'anidride carbonica in atmosfera richiederà un mix di tecnologie energetiche, di cui potrebbero far parte anche i reattori nucleari, che non emettono CO_2 ma sono considerati pericolosi a causa di alcuni importanti incidenti. Questo rischio potrebbe essere fortemente ridotto.
Da decenni i reattori commerciali usano lo stesso combustibile: piccoli cilindri (*pellet*) di diossido di uranio impilati in lunghe barre, sempre cilindriche, in lega di zirconio. Lo zirconio permette ai neutroni che si generano per fissione nei pellet di attraversare facilmente le numerose barre immerse in acqua nel nucleo dei reattori, supportando la reazione nucleare auto-sostenuta che produce calore.
Il guaio è che se lo zirconio si surriscalda, può reagire con l'acqua e produrre idrogeno, che può esplodere. Questo scenario ha riguardato due dei peggiori incidenti avvenuti nei reattori: la potenziale esplosione e parziale fusione del nocciolo a Three Mile Island nel 1979 negli Stati Uniti e l'esplosione con rilascio di radioattività a Fukushima Daiichi nel 2011 in Giappone. Per inciso, l'incidente di Chernobyl del 1986 è stato provocato da difetti nella progettazione del rettore ed errori degli operatori.
Produttori industriali come Westinghouse Electric Company e Framatome stanno accelerando lo sviluppo di combustibili che si surriscaldano meno facilmente e se lo fanno non producono idrogeno o ne producono poco. In alcune varianti, il rivestimento di zirconio è a sua volta rivestito per minimizzare le reazioni chimiche. In altre, zirconio e diossido di uranio sono sostituiti con materiali diversi. Le nuove configurazioni possono essere inserite nei reattori esistenti con poche modifiche, quindi potrebbero essere introdotte nel prossimo decennio. Test accurati nei reattori, già iniziati, dovranno dimostrare di aver avuto successo, e gli enti regolatori dovranno essere soddisfatti. Un vantaggio in più è che i nuovi combustibili potrebbero contribuire a un funzionamento più efficiente degli impianti, rendendo l'energia nucleare più competitiva in termini di costi: una motivazione significativa per le aziende del settore elettrico, perché l'energia da gas naturale, Sole e vento è meno costosa.
Anche se l'energia nucleare conosce una fase di stallo negli Stati Uniti ed è in graduale dismissione in Germania e altrove, Russia e Cina costruiscono centrali in modo aggressivo. Quei mercati potrebbero essere redditizi per i produttori di nuovi combustibili. Inoltre la Russia sta adottando altre misure di sicurezza; di recente l'azienda statale Rosatom ha installato in casa e all'estero nuovi sistemi a sicurezza passiva in grado di bloccare il surriscaldamento anche in caso di mancanza di elettricità nell'impianto e di impossibilità di far circolare attivamente

il refrigerante. Anche Westinghouse e altre aziende hanno aggiornato i loro progetti con funzionalità a sicurezza passiva. Alcuni produttori stanno sperimentando modelli «di quarta generazione» che usano sodio liquido o sali fusi al posto dell'acqua per trasferire il calore generato dalla fissione, eliminando la possibilità di pericolosi accumuli di idrogeno. A quanto pare, la Cina intende collegare alla rete elettrica un reattore dimostrativo raffreddato a elio.

Negli Stati Uniti, la mancanza di un impegno politico per un deposito geologico permanente del combustibile nucleare esausto frena da tempo l'espansione del settore. Ma forse il clima sta cambiando. Oltre una dozzina di parlamentari ha proposto misure per concedere di nuovo autorizzazioni per il deposito di Yucca Mountain, in Nevada, proposto dal 1987 come sito di stoccaggio per il paese. Una senatrice sostiene l'adozione di piccoli reattori modulari in fase di sviluppo all'Idaho National Laboratory, e anche Rosatom produce reattori di taglia ridotta. Un gruppo di paesi occidentali ha stipulato un accordo provvisorio con la statunitense NuScale Power per una dozzina dei suoi reattori modulari. Combustibili migliori e reattori di taglia ridotta potrebbero essere una parte importante della rinascita dell'energia nucleare.

MEDICINA E BIOTECNOLOGIE

Archiviare dati con il DNA

Il sistema con cui la vita conserva i propri dati può essere adattato per gestire quantità enormi di informazioni

di Sang Yup Lee

Ogni minuto del 2018 Google ha effettuato 3,88 milioni di ricerche, e le persone hanno guardato 4,33 milioni di video su YouTube, inviato 159.362.760 mail, pubblicato 473.000 *tweet* e 49.000 foto su Instagram, secondo Domo, una società informatica. Si stima che entro il 2020 verranno generati globalmente 1,7 megabyte di dati al secondo a persona, il che, ipotizzando una popolazione mondiale di 7,8 miliardi di persone, si traduce in circa 418 zettabyte (informazioni sufficienti a riempire 418 miliardi di dischi rigidi da un terabyte) in un solo anno. I sistemi magnetici e ottici di archiviazione di dati, che oggi contengono tutti questi 0 e 1, possono durare non più di un secolo, se va bene. Inoltre, il funzionamento dei centri di elaborazione dati assorbe quantità enormi di energia. In breve, stiamo per avere un serio problema di archiviazione, che non farà altro che aggravarsi nel tempo.

C'è però un'alternativa ai dischi rigidi che fa progressi: l'archiviazione basata sul DNA. Il DNA, composto da lunghe catene di nucleotidi indicati con A, T, C e G, è il materiale che conserva l'informazione della vita. I dati possono essere archiviati nella sequenza di queste lettere, trasformando il DNA in un nuovo tipo di tecnologia dell'informazione. Già ora è sequenziato (letto), sintetizzato (scritto) e copiato fedelmente e con facilità. Inoltre, il DNA è stabile, come ha dimostrato il sequenziamento completo del genoma del fossile di un cavallo vissuto oltre 500.000 anni fa. E conservarlo non richiede molta energia.

Ma il punto forte è la sua capacità di archiviazione. Nel DNA si possono archiviare fedelmente quantità imponenti di dati, con una densità che supera di gran lunga quella dei dispositivi elettronici. Per esempio, un semplice batterio come *Escherichia coli* ha una densità di archiviazione pari a circa 10^{19} bit per centimetro cubo, secondo calcoli pubblicati nel 2016 su «Nature Materials» da George Church, della Harvard University, e colleghi. Con questa densità, tutti le attuali necessità di archiviazione del mondo potrebbero essere ampiamente soddisfatte per un anno da un cubo di DNA di circa un metro di lato.

La prospettiva di archiviare i dati nel DNA non è puramente teorica. Nel 2017, per esempio, il gruppo di Church a Harvard ha adottato la tecnologia di *editing* del DNA detta CRISPR per registrare immagini di una mano nel DNA di *E. coli* e per poi leggerle con un'accuratezza superiore al 90 per cento. E un gruppo di ricercatori dell'Università di Washington e di Microsoft Research hanno sviluppato un sistema automatico per scrivere, conservare e leggere dati codificandoli nel DNA. Un certo numero di aziende, fra cui la stessa Microsoft e Twist Bioscience, sono al lavoro per far progredire la tecnologia.

Nel frattempo il DNA è già impiegato per gestire dati, in un altro senso, da parte di ricercatori che cercano di dare un senso a volumi enormi di dati. Recenti progressi nella prossima generazione di tecniche di sequenziamento permettono di leggere facilmente e simultaneamente miliardi di sequenze. Grazie a questa possibilità, i ricercatori possono usare una sorta di codice a barre – in cui sequenze di DNA sono usate come «etichette» molecolari identificative – per tenere traccia dei risultati sperimentali. I codici a barre di DNA sono impiegati per accelerare in modo spettacolare la velocità della ricerca in campi come ingegneria chimica, scienza dei materiali e nanotecnologie. Al Georgia Institute of Technology, per esempio, il laboratorio di James H. Dahlman sta rapidamente identificando tecnologie geniche più sicure; altri scienziati stanno cercando di capire come combattere la resistenza ai farmaci e come prevenire le metastasi del cancro.

Fra le difficoltà da superare per rendere l'archiviazione di dati basata sul DNA un'attività all'ordine del giorno ci sono i costi e la velocità di lettura e scrittura, che devono migliorare ancora affinché questo approccio diventi competitivo rispetto all'archiviazione elettronica. Tuttavia, anche se non dovesse diventare un materiale di archiviazione diffuso ovunque, il DNA sarà quasi sicuramente impiegato per generare informazioni su scale senza precedenti e per preservare a lungo termine alcuni tipi di dati.

ENERGIA

10

Accumulare energia rinnovabile nelle centrali elettriche

Come superare un grande ostacolo per l'impiego di fonti rinnovabili su larga scala

di Andrea Thompson

Il modo in cui il mondo ottiene elettricità sperimenta una rapida transizione, guidata dall'urgenza di «decarbonizzare» il sistema energetico e dal precipitare dei costi delle tecnologie per eolico e solare. Secondo l'Energy Information Administration, nel decennio scorso negli Stati Uniti l'elettricità generata da fonti rinnovabili è raddoppiata, principalmente da installazioni per eolico e solare. Nel gennaio 2019 l'EIA ha previsto che nei successivi due anni eolico, solare e altre rinnovabili non idroelettriche sarebbero cresciute più rapidamente rispetto alle altre fonti che fanno parte del portafoglio elettrico. Ma la natura intermittente delle fonti rinnovabili implica che le aziende del settore hanno bisogno di una soluzione per accumulare energia di riserva per i periodi in cui il Sole non splende e i venti non soffiano. Motivo per cui cresce l'interesse per le tecnologie con cui immagazzinare energia, in particolare per le batterie a ioni litio, che sono finalmente pronte a diventare qualcosa di più che una semplice comparsa nelle reti elettriche.

Da decenni negli Stati Uniti i sistemi di pompaggio idroelettrico, un sistema semplice che caratterizza bacini idrici a quote diverse, dominano il campo dei metodi di stoccaggio di energia su larga scala. Per immagazzinare l'energia si pompa acqua nel serbatoio a quota più elevata; quando poi serve, si lascia scorrere l'acqua verso il serbatoio più in basso attraverso una turbina. Secondo il Department of Energy, oggi i sistemi di pompaggio idroelettrico costituiscono il 95 per cento delle strutture di accumulo di energia a scala di impianto. Ma con la crescita dell'efficienza e dell'affidabilità, e la forte diminuzione dei costi di fabbricazione, l'impiego delle batterie a ioni litio è aumentato parecchio. Sempre negli Stati Uniti, oggi rendono conto di oltre l'80 per cento della capacità di immagazzinamento in batterie a scala di impianto, balzata in un decennio da qualche megawatt a 866 megawatt nel febbraio 2019, afferma l'EIA. Un'analisi del marzo 2019 effettuata da Bloomberg New Energy Finance riferisce che il costo dell'elettricità da queste batterie è sceso del 76 per cento rispetto al 2012, rendendole quasi competitive con le centrali, in genere alimentate a gas naturale, che sono accese nei periodi di massima domanda di elettricità. Finora le batterie sono state largamente usate per operare rapidi e brevi aggiustamenti in modo da mantenere i livelli di potenza, tuttavia aziende del settore elettrico di diversi Stati, come Florida e California, si stanno dotando di batterie a ioni litio in grado di funzionare per 2-4 ore. In precedenza Wood Mackenzie, una società di ricerca in campo energetico, aveva stimato che il mercato dello stoccaggio di elettricità sarebbe raddoppiato tra il 2018 e il 2019 e triplicato tra il 2019 e il 2020.

Secondo gli esperti del settore, probabilmente le batterie a ioni litio saranno la tecnologia dominante per i prossimi 5-10 anni e il loro continuo miglioramento porterà a batterie in grado di accumulare energia sufficiente per 4-8 ore; abbastanza, per esempio, per trasferire l'energia generata dal Sole al picco serale della domanda.

Tuttavia, per arrivare al punto in cui fonti rinnovabili e accumulo di energia potranno gestire il carico elettrico di base saranno necessari metodi di stoccaggio per tempi più lunghi, e questo significa andare oltre le batterie a ioni litio. I potenziali candidati vanno da altre opzioni ad alta tecnologia, come le batterie a flusso, in cui si pompano elettroliti liquidi, e le celle a combustibile a idrogeno, fino a idee concettualmente più semplici, come il pompaggio idroelettrico e lo stoccaggio per gravità. Il pompaggio idroelettrico è economico una volta installato, però costoso da costruire, e si può usare solo in certi tipi di territorio. Semplice è anche l'idea dell'accumulo per gravità, che propone di usare l'elettricità disponibile in eccesso per sollevare un blocco pesante, che poi può essere abbassato per far funzionare una turbina e quindi generare elettricità. Alcune aziende lavorano per dimostrarne la fattibilità e hanno attirato investimenti, ma l'idea deve ancora decollare.

Altre opzioni sono ancora in via di sviluppo in modo da renderle abbastanza affidabili, efficienti e competitive nei costi rispetto alle batterie a ioni litio. Secondo l'EIA, alla fine del 2017 negli Stati Uniti c'erano tre soli sistemi di accumulo su larga scala in batterie a flusso e i sistemi basati sull'idrogeno rimangono ancora allo stadio dimostrativo. Il governo degli Stati Uniti sta finanziando alcuni lavori in questo campo, in particolare tramite l'Advanced Research Projects Agency-Energy (ARPA-E), tuttavia gran parte degli investimenti in queste tecnologie – e in generale sullo stoccaggio di energia – riguarda la Cina e la Corea del Sud, paesi che hanno anche dato un forte impulso alla ricerca in questo settore.

Non è chiaro se e quanto continuerà a scendere il costo dello stoccaggio di energia. Ma gli impegni sempre più numerosi dei governi per una produzione di elettricità senza emissioni di gas serra continueranno a spingere verso l'aumento della capacità di immagazzinamento collegata alle reti elettriche.

PER APPROFONDIRE

Il caos ordinato delle proteine. Dunker A.K. e Kriwacki R.W., in «Le Scienze» n. 514, giugno 2011.

Costruire una rete elettrica intelligente basata sul meteo. Fairley P., in «Le Scienze» n. 602, ottobre 2018.

Ripensando il reattore. Rod McCullum, in «Le Scienze» n. 611, luglio 2019.

Dieci tecnologie emergenti per il 2019. Rapporto speciale, in «Le Scienze» n. 605, gennaio 2019.

Tutti i dati del mondo in un uovo. Dahlman J.E., in «Le Scienze» n. 613, settembre 2019.

EVOLUZIONE

Mostri dei cieli mesozoici

Grazie a nuovi fossili e modelli matematici, oggi gli pterosauri sono meno misteriosi

di Michael B. Habib

Michael B. Habib, paleontologo e biomeccanico alla University of Southern California, studia l'anatomia e il movimento di pterosauri, uccelli e dinosauri piumati.

L'era mesozoica, durata da 251 a 66 milioni di anni fa, è spesso definita l'epoca dei dinosauri. Ma, sebbene regnassero incontrastati sulla Terra, i dinosauri non erano i padroni dell'aria. A dominare i cieli era un gruppo di animali completamente diversi: gli pterosauri. Questi animali sono stati i primi vertebrati a evolvere il volo battuto e a conquistare l'aria, molto prima che gli uccelli prendessero il volo. Il dominio degli pterosauri è durato oltre 160 milioni di anni, finché sono scomparsi, insieme ai dinosauri non aviani, alla fine del Cretaceo, intorno a 66 milioni di anni fa.

In quel periodo hanno evoluto alcuni tra gli adattamenti anatomici più estremi osservati in animali estinti o ancora viventi. Il più piccolo di questi predatori aveva le dimensioni di un passero. Il più grande aveva un'apertura alare paragonabile a quella di un caccia F-16. In molti avevano la testa più grande del corpo: sostanzialmente, erano letali mascelle volanti. Gli pterosauri sorvegliavano tutti gli oceani e i continenti della Terra. Nel Mesozoico nessun animale era al sicuro dal loro sguardo.

Contrariamente ai dinosauri, la cui eredità è stata raccolta dagli uccelli, gli pterosauri non hanno lasciato discendenti. Come risultato, tutto quello che i paleontologi sanno su di loro proviene da testimonianze fossili, che finora sono state frammentarie: è rimasto solo un barlume della loro gloria passata, insieme a molte domande su quell'anatomia bizzarra e sul destino sfortunato. Da decenni i paleontologi si interrogano su questi misteri. Ora finalmente alcune scoperte di nuovi fossili, combinate con modelli matematici in cui strutture anatomiche e biomeccanica sono abbastanza semplificate da poter applicare le equazioni delle proprietà fisiche e avere una stima piuttosto precisa di forza, peso, velocità e così via, stanno fornendo indizi. Quello che gli scienziati stanno scoprendo è che gli pterosauri erano ancora più straordinari di quanto immaginato.

Colossi alati

Uno dei misteri che ancora avvolgono gli pterosauri è come facessero a spiccare il volo gli esemplari più grandi di questo gruppo. I giganti come *Quetzalcoatlus,* scoperto in Texas, e *Hatzegopteryx,* venuto alla luce in Romania, erano alti come una giraffa e avevano un'apertura alare superiore ai 9 metri. Questi animali avevano mascelle lunghe il doppio di quelle del *Tyrannosaurus rex.* Dovevano avere arti superiori grandi quasi come il tronco di un essere umano adulto di taglia media. Erano colossi, pesanti almeno 300 chilogrammi. Come termine di paragone, l'uccello più grande che abbia mai solcato i cieli – *Argentavis,* vissuto 6 milioni di anni fa in Argentina – con ogni probabilità pesava meno di 75 chilogrammi.

In effetti la differenza tra i membri più grandi di questi due gruppi è così forte da fare ipotizzare a vari ricercatori che gli pterosauri più grandi non fossero in grado di volare (ma questo sarebbe sorprendente, visti i loro numerosi adattamenti anatomici per il volo). Altri hanno proposto che potessero volare, ma solo in condizioni molto speciali dell'aria e del terreno: per esempio con un'atmosfera più densa di quella attuale. D'altronde sembra inconcepibile che uccelli di una simile stazza fossero in grado di volare. Di recente vari scienziati, me compreso, hanno effettuato studi dimostrando innanzitutto che uccelli di dimensioni enormi non avrebbero una potenza sufficiente per spiccare il volo.

Ma gli pterosauri non erano uccelli. Nel corso dell'ultimo decennio io e i miei colleghi abbiamo fatto molti calcoli su lancio e potenza di volo degli pterosauri, dimostrando non solo che gli esemplari giganti erano in grado di lanciarsi e volare, ma che probabilmente per farlo non avevano nemmeno bisogno di circostanze particolari. In linea con queste conclusioni, da analisi geochimiche di rocce sedimentarie e da analisi microanatomiche di fossili vegetali ora sappiamo che nel Cretaceo superiore – l'apogeo degli pterosauri enormi – le condizioni di aria e terreno non erano

Illustrazione di Chase Stone (*pagine precedenti*)

IN BREVE

Gli pterosauri sono stati i primi animali vertebrati a evolvere il volo battuto, quasi 80 milioni di anni prima degli uccelli.

Durante il loro lungo dominio, gli pterosauri hanno evoluto alcuni degli adattamenti più estremi rispetto a quelli di qualunque altro animale vissuto prima e dopo di loro.

Oggi nuovi fossili e modelli matematici stanno fornendo risposte a domande di lunga data su come sono vissuti gli pterosauri e sul perché alla fine si sono estinti, permettendo agli uccelli di conquistare i cieli.

particolarmente diverse da quelle attuali. A essere diversa, e unica, era l'anatomia degli pterosauri.

Per volare con una mole gigantesca, un animale ha bisogno di tre cose. La prima è uno scheletro con un rapporto molto alto tra spessore e peso, il che si traduce in uno scheletro con un volume elevato ma bassa densità. Sia gli pterosauri sia gli uccelli hanno uno scheletro di questo tipo: molte loro ossa sono cave. Per esempio in *Quetzalcoatlus* le pareti dell'osso dell'arto superiore avevano uno spessore intorno ai 3 millimetri, simile al guscio di un uovo di struzzo, ma l'osso aveva un diametro di oltre 26 centimetri all'altezza del gomito.

La seconda cosa di cui ha bisogno un grande animale volante è un elevato coefficiente di portanza massima. Questo numero descrive quanta spinta generano le ali per una data velocità e superficie alare. Con un coefficiente elevato un animale può essere più pesante, perché le sue ali sostengono un peso maggiore a velocità più bassa. Questo rapporto a sua volta significa che l'animale ha bisogno di minore velocità al decollo, il che fa una grande differenza nella forza muscolare necessaria al lancio. Le ali a membrana, come quelle di pterosauri e pipistrelli, producono più portanza per unità di velocità e superficie rispetto alle ali piumate degli uccelli. Questa portanza aggiuntiva migliora la capacità di manovra a bassa velocità, aiutando gli animali piccoli a girarsi in poco spazio e quelli grandi a decollare e atterrare.

La terza, la più importante, è la potenza di lancio. Anche con ali molto efficienti e ampie, per prendere il volo un grande animale volante ha comunque bisogno di molta potenza di salto. Non sbatte le ali fino ad alzarsi in volo, né sfrutta la gravità per decollare da un punto elevato, come una scogliera. A bassa velocità le ali non producono molta portanza, e lanciarsi sfruttando la gravità significherebbe tentare il decollo accelerando nella direzione sbagliata: una prospettiva rischiosa. Un salto potente offre invece velocità e altezza critiche per iniziare il volo. Aumentando la potenza di salto si arriva a una migliore potenza di lancio. I grandi volatori devono essere bravi saltatori.

Nel complesso, la testa e il corpo dello pterosauro potevano quasi sembrare di animali diversi

Molti uccelli riescono a compiere salti impressionanti. Tuttavia sono vincolati dall'eredità dei dinosauri teropodi: tutti gli uccelli sono bipedi, come appunto i loro antenati teropodi, quindi per saltare possono usare solo gli arti posteriori. Gli pterosauri, al contrario, a terra erano quadrupedi. Le ali si ripiegavano e servivano come arti per camminare, e quindi anche per saltare. Questo aspetto curioso dell'anatomia degli pterosauri è confermato da numerosi sentieri fossili splendidamente conservati. Essere quadrupede determina un cambiamento drastico nelle dimensioni massime di un animale volante. Per lanciarsi gli pterosauri potevano usare non solo gli arti posteriori ma anche quelli anteriori, molto più grandi, disponendo così di una potenza più che doppia per il decollo. Avevano la perfetta combinazione di adattamenti per diventare colossi volanti.

In studi precedenti sono stati realizzati modelli di lanci a due arti per pterosauri giganti. Nel 2004, per esempio, Sankar Chatterjee, della Texas Tech University, ha calcolato come facesse *Quetzalcoatlus* a lanciarsi in aria usando solo gli arti posteriori. Il paleontologo però ha stabilito che quell'approccio poteva funzionare solo con un peso fino a 75 chilogrammi, correndo in discesa e controvento. Il lancio a quattro arti permette un peso più realistico dell'animale e condizioni ambientali meno restrittive.

Teste pesanti

Anche se alla fine potremmo risolvere il grande mistero della dimensione complessiva degli pterosauri, le dimensioni relative delle parti del loro corpo continuano a confonderci. Gli pterosauri avevano proporzioni insolite. Tutti avevano elementi degli arti sproporzionati: le mani, per esempio, erano forse le più specializzate tra tutti i vertebrati, con un quarto dito enorme che sosteneva l'ala. Ma questo non è troppo sorprendente, visto che quella mano così strana era intrinseca all'ala dello pterosauro e alla sua capacità di volare. A lasciare perplessi sia gli scienziati sia gli appassionati non sono tanto le ali degli pterosauri, quanto la testa.

Anche i primi pterosauri avevano una testa decisamente grande: quella di *Rhamphorhynchus*, una specie di 150 milioni di anni fa, nel Giurassico superiore, era lunga quasi quanto il corpo. In seguito, durante il Cretaceo, la testa ha assunto dimensioni ancora più estreme. I fossili di specie come *Quetzalcoatlus* – o *Anhanguera,* proveniente dal Brasile – dimostrano che in media gli pterosauri sono diventati più grandi, ma in proporzione la testa è diventata gigantesca. Nel Cretaceo il cranio di un normale pterosauro poteva essere lungo il doppio o il triplo del corpo (misurato come distanza tra spalla e anca). In alcuni il cranio superava di quattro volte la lunghezza del corpo. Questi animali però non avevano una scatola cranica particolarmente grande: a crescere in modo incredibile erano stati muso e mascelle. L'anatomia cranica degli pterosauri era ulteriormente esagerata da sporgenze ossee sotto la mascella, da creste che svettavano in cima al cranio e altri particolari. Nel complesso, testa e corpo potevano quasi sembrare di animali diversi.

Le stranezze non finiscono qui. Mentre nella maggioranza degli animali, esseri umani compresi, le ossa del collo sono tra le più piccole della spina dorsale, spesso nei campioni di pterosauro le vertebre cervicali sono le più grandi, addirittura hanno un volume doppio rispetto alle vertebre del tronco. Uno dei nuovi arrivati nell'albero genealogico degli pterosauri offre un ottimo esempio. David Hone, della Queen Mary University di Londra, François Therrien, del canadese Royal Tyrrell Museum in Alberta, e io presenteremo fossili di questa specie, scoperta in Alberta, in uno studio di prossima pubblicazione su «Journal of Vertebrate Paleontology». [Lo studio è stato pubblicato dopo la stampa della versione originale di questo articolo su «Scientific American», N.d.R.]. Le abbiamo dato un nome che significa «drago di ghiaccio del nord»: ufficialmente si riferisce al luogo in cui la specie è stata scoperta, in realtà rende omaggio al drago Viserion del *Trono di spade*. Ha vertebre cervicali che sono lunghe quasi come l'omero e forti il doppio dell'omero, l'osso dell'ala a cui è attaccata la maggior parte dei muscoli per il volo e che fa la maggior parte del lavoro per mantenere l'animale in aria. In alcune specie il collo è lungo il triplo del tronco, così come la testa, al punto che oltre il 75 per cento della lunghezza totale dello pterosauro potrebbe essere costituito da testa e collo. Perché un animale dovrebbe essere così ridicolmente sproporzionato? E un simile piano corporeo come potrebbe funzionare per una creatura volante?

Gli specialisti cercano ancora di capire perché gli pterosauri abbiano raggiunto un'anatomia così folle, ma una spiegazione probabile è quella che chiamo l'ipotesi «se fosse facile, lo farebbero tutti». In breve, avere grandi mascelle per nutrirsi e un grande muso per inviare segnali a partner e rivali potrebbe essere un'ot-

Sempre più grandi e strani

Tutti gli pterosauri avevano proporzioni strane. Avevano mani fortemente modificate per sostenere le ali, e la testa grande rispetto al corpo. Con il tempo, gli pterosauri hanno evoluto un piano corporeo ancora più estremo, con una testa che in proporzione al corpo era gigantesca. In alcune forme del Cretaceo, come *Quetzalcoatlus*, testa e collo potevano costituire oltre il 75 per cento della lunghezza totale dell'animale. In ultima analisi, la loro tendenza a diventare sempre più grandi potrebbe avere contribuito alla loro estinzione, alla fine del Cretaceo.

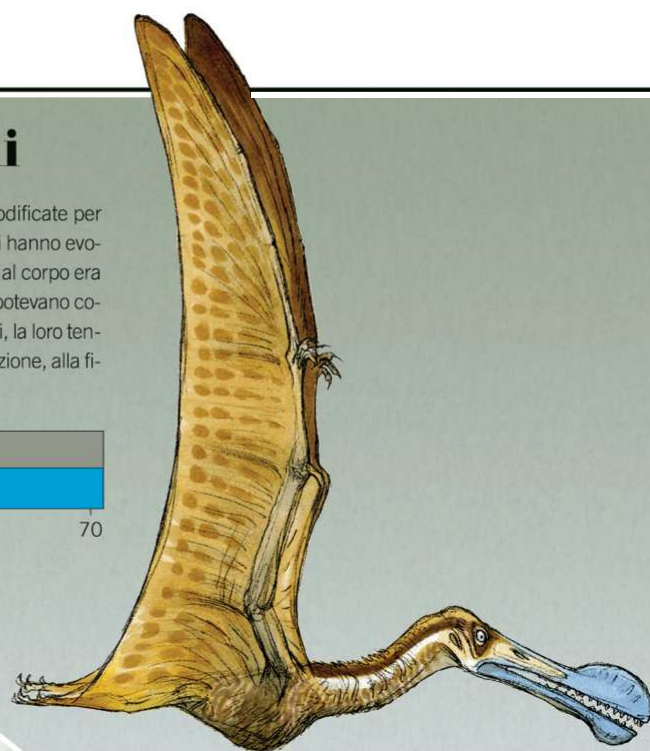
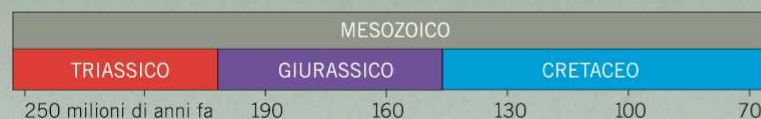
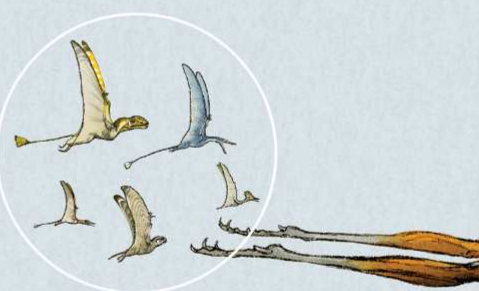
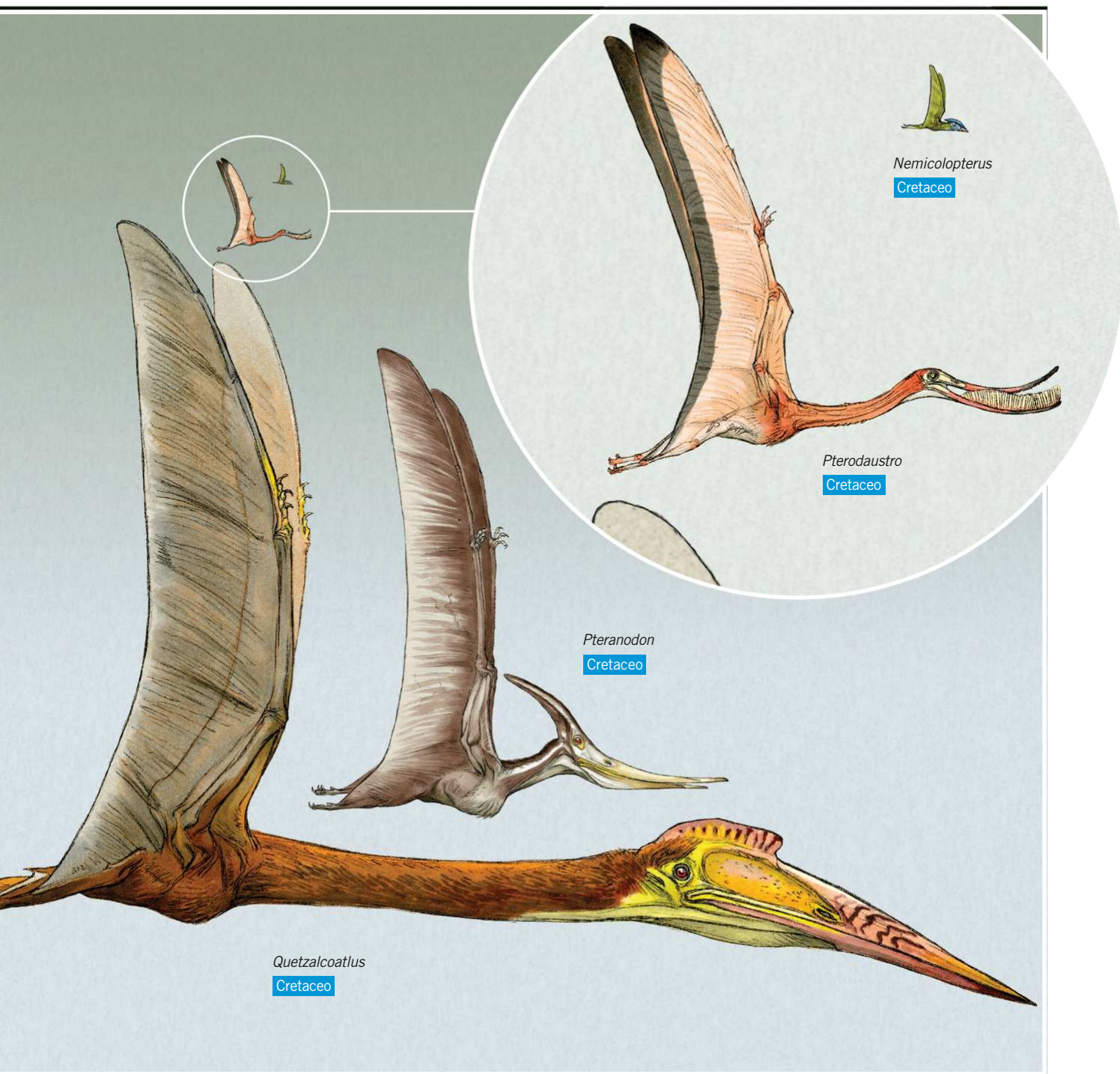



Illustrazione di Terry Whitlatch

tima possibilità per molti animali, ma normalmente i costi legati a queste caratteristiche sono proibitivi. I mammiferi, per esempio, hanno una scatola cranica grande, quindi via via che aumentano le loro dimensioni, la testa diventa molto pesante. Gli pterosauri potrebbero aver sperimentato uno sviluppo in cui le proporzioni del muso erano meno legate a quelle della parte posteriore del cranio. Questo avrebbe permesso loro di evolvere mascelle gigantesche senza avere una scatola cranica enorme.

Gli pterosauri avevano inoltre aperture extra nel cranio, la più grande delle quali era la cosiddetta finestra antiorbitale, davanti agli occhi. Anche i dinosauri ne erano provvisti, ma gli pterosauri si sono spinti oltre, in alcuni casi evolvendo un'apertura così grande che avrebbe potuto contenere le ossa del tronco. Questa finestra doveva essere coperta di pelle e altri tessuti, probabilmente non sarà stata evidente alla vista, ma rendeva il cranio molto leggero in rapporto al volume. Inoltre può darsi che le ossa craniche contenessero molta aria, come quelle di alcuni uccelli attuali.

Pur con queste caratteristiche che riducevano il peso, però, spesso gli pterosauri avevano una testa così colossale che doveva essere piuttosto pesante. Forse è controintuitivo, ma sotto questo

Design Studio Press, fonte: *Flying Monsters*

aspetto il fatto che fossero animali volanti potrebbe avere giocato a loro favore. Il problema principale di una testa pesante non è tanto l'aumento complessivo del peso corporeo, quanto l'effetto sproporzionato che ha il peso del cranio sul baricentro dell'animale. Una testa enorme, soprattutto se si trova su un collo a sua volta enorme, sposta il baricentro molto in avanti. E in un tipico animale che cammina questo provoca forti ripercussioni sull'andatura: per raggiungere un equilibrio, anche gli arti anteriori devono spostarsi in avanti, in una posizione scomoda. Gli pterosauri però avevano arti anteriori enormi, fatti apposta per il volo.

Le ricostruzioni dell'andatura effettuate da Kevin Padian, dell'Università della California a Berkeley, hanno dimostrato che, quando uno pterosauro camminava, le zampe anteriori si trovavano nella posizione giusta per sostenere il peso di testa, collo e torace. In una camminata, gran parte della propulsione veniva dagli arti posteriori, quindi gli pterosauri riuscivano a reggere il notevole peso della testa sugli arti anteriori, assai ingombranti, e a spingersi in avanti con quelli posteriori, di dimensioni più normali.

Immaginate di usare le stampelle per camminare e al tempo stesso ridurre al minimo il peso sulle gambe: portereste in avan-

SEQUENZA DI LANCIO

In alto e via nel cielo

Gli pterosauri avevano evidenti adattamenti al volo, ma probabilmente pesavano almeno 300 chilogrammi, molto di più dei più grandi uccelli volatori conosciuti. Come facevano simili colossi a decollare? Contrariamente agli uccelli, che camminano e saltano in aria usando solo le zampe posteriori, gli pterosauri andavano a quattro zampe, come si nota dai percorsi fossili.

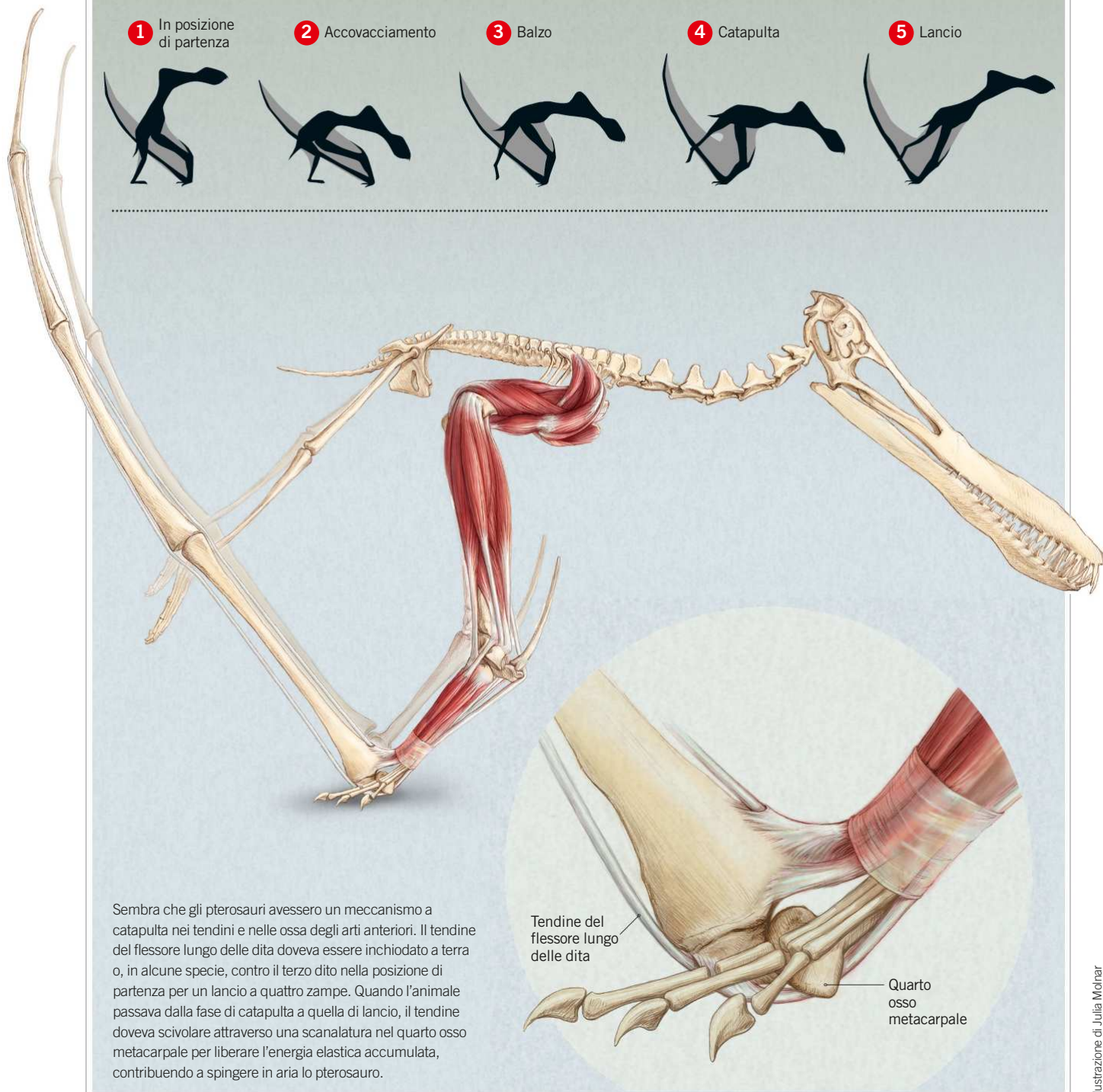
I modelli matematici indicano che lanciarsi partendo da una posizione a quattro zampe – spingendosi prima con gli arti posteriori, poi con quelli anteriori – doveva offrire agli pterosauri giganti la potenza di salto necessaria per decollare. Contrariamente a un lancio a due zampe, uno a quattro doveva sfruttare i potenti muscoli per il volo e un meccanismo a catapulta nelle zampe anteriori.

Sembra che gli pterosauri avessero un meccanismo a catapulta nei tendini e nelle ossa degli arti anteriori. Il tendine del flessore lungo delle dita doveva essere inchiodato a terra o, in alcune specie, contro il terzo dito nella posizione di partenza per un lancio a quattro zampe. Quando l'animale passava dalla fase di catapulta a quella di lancio, il tendine doveva scivolare attraverso una scanalatura nel quarto osso metacarpale per liberare l'energia elastica accumulata, contribuendo a spingere in aria lo pterosauro.

Illustrazione di Julia Molnar

ti simultaneamente entrambe le stampelle, appoggiandovi tutto il vostro peso, quindi spingereste avanti le gambe fino a toccare terra, per poi ripetere l'operazione. L'andatura degli pterosauri con arti anteriori più lunghi doveva avere questo aspetto. Tra l'altro, durante il decollo gli arti posteriori dovevano spingere per primi, seguiti da quelli anteriori, per una perfetta spinta in due tempi.

Questa configurazione non avrà permesso la camminata più efficiente possibile, ma era fattibile. E in ogni caso gli pterosauri si spostavano per lo più volando. Può darsi che le specie di pterosauri con ali particolarmente lunghe e strette, come quelle di alcuni uccelli marini attuali, volassero in continuazione per mesi o addirittura per anni, toccando terra solo per accoppiarsi o deporre le uova. Lo pterosauro *Nyctosaurus* potrebbe avere avuto le ali più efficienti – e quindi il più lungo volo planato continuo – di tutti gli animali vertebrati di qualsiasi epoca.

In aria è molto più facile affrontare il problema del baricentro: per essere stabile, un animale deve avere il centro di portanza allineato con il baricentro. Sembrerebbe difficile per una creatura con una testa gigantesca e di conseguenza un baricentro avanzato. Ma nello pterosauro il centro di portanza era vicino al fronte di un'ala, quindi per allinearlo con il baricentro l'animale non doveva fare altro che inclinare le ali moderatamente in avanti dalla posizione di base, come hanno stabilito Colin Palmer, dell'Università di Bristol, nel Regno Unito, e colleghi. Le ali spostate in avanti possono a loro volta provocare instabilità, che però si poteva compensare con la flessibilità delle ali dello pterosauro e i rapidi riflessi cerebellari tipici dei vertebrati.

Un mostro volante alto più di 4 metri non ha bisogno di sfuggire al pericolo scavando tane: è lui il pericolo

A parte le questioni di stabilità, le ali spostate in avanti possono offrire notevoli vantaggi. Uno è che tendenzialmente le estremità sono l'ultima parte delle ali a finire in stallo. In uno stallo, che in genere avviene a bassa velocità, l'ala perde all'improvviso molta portanza. In particolare lo stallo di estremità è catastrofico, perché disturba in breve tempo la scia dell'ala, compromettendo spinta e controllo, e aumentando di molto l'attrito. La capacità di ritardare quella perdita di portanza rende atterraggio e decollo molto più morbidi, un aspetto importante per gli animali di grandi dimensioni. Da questo punto di vista, una testa enorme poteva in realtà essere un vantaggio per un animale volante con le ali flessibili: fa avanzare il baricentro, che a sua volta sposta in avanti l'angolo di freccia, rendendo più difficile lo stallo dell'ala, e di conseguenza l'animale può volare più lentamente e diventare più grande.

Fine di una dinastia

Per 80 milioni di anni gli pterosauri sono stati gli unici vertebrati capaci di volo battuto. Poi, 150 milioni di anni fa, nel Giurassico, un secondo gruppo di vertebrati, i dinosauri piumati, si è alzato in volo. Il gruppo comprendeva creature a quattro ali, come *Microraptor* e *Anchiornis,* oltre ai volatori più abili della banda: gli uccelli. Nel Cretaceo inferiore, un'ampia varietà di uccelli condivideva i cieli con gli pterosauri. Nonostante questo riassetto nella nicchia aerea, gli pterosauri hanno continuato a dominare tra gli animali volanti medi e grandi, soprattutto negli habitat aperti. Gli uccelli erano confinati in zone con vegetazione, dove dimensioni ridotte e agilità erano un vantaggio. Così gli pterosauri hanno mantenuto la supremazia negli spazi aerei aperti.

Ma quando 66 milioni di anni fa un asteroide ha colpito la Terra, provocando la morte di tutti i dinosauri non aviani, anche il regno degli pterosauri è giunto alla fine. Finora le scoperte paleontologiche indicano che nessuna specie di pterosauro ha superato la fine del Cretaceo: si sono estinte tutte, come la maggior parte degli uccelli. Solo una linea di discendenza è sopravvissuta: i neorniti, o «nuovi uccelli». Quell'unica linea però è stata sufficiente: ha portato a migliaia e migliaia di nuove specie, e oggi gli uccelli neorniti rappresentano il secondo gruppo di vertebrati per ampiezza, superato solo dai pesci ossei, con oltre 12.000 specie riconosciute.

Perché alla fine del Cretaceo gli pterosauri hanno subito un destino peggiore degli uccelli? Un motivo potrebbe essere la loro tendenza alle grandi dimensioni. In quel periodo apocalittico sono sopravvissuti pochissimi animali terrestri con un peso da adulti superiore ai 20 chilogrammi. Ed essere non solo grandi ma anche volanti potrebbe essere stato oneroso, perché i grandi volatori tendono a planare per gran parte del volo, ma per farlo servono le giuste condizioni meteo. Quando l'asteroide ha colpito la Terra, ha vaporizzato parte della crosta terrestre e il rientro di questa nuvola di roccia e metallo stracarica di energia ha incendiato il cielo in tutto il mondo. Esperti di volo planato come Jim Cunningham, ingegnere con decenni di esperienza nella progettazione di velivoli, hanno fatto notare che l'impatto potrebbe avere alterato le condizioni per planare in tutto il mondo per un mese: un tempo sufficiente a far morire di fame gli pterosauri, che per mangiare dovevano librarsi in volo.

Le piccole dimensioni non sono state sufficienti a salvarsi, visto che si è estinta anche la maggior parte degli uccelli. I sopravvissuti potrebbero essersi nutriti di cibo in grado di resistere a un inverno simile a quello nucleare, per esempio i semi. Inoltre, forse riuscivano a nascondersi dai predatori scavando tane, come fanno oggi molti uccelli. A quanto pare gli pterosauri non erano specialisti dei semi, né scavavano tane. Perché avrebbero dovuto? Un mostro volante che divora dinosauri, alto più di 4 metri, non ha bisogno di sfuggire al pericolo scavando: è lui, il pericolo.

Sebbene sia finita con l'estinzione, quella degli pterosauri è una storia di successo: sono stati gli insuperabili giganti dei cieli, grazie all'evoluzione di caratteristiche anatomiche straordinarie, mai viste prima e dopo di loro. Dagli pterosauri abbiamo imparato molto sui limiti di forma e funzioni negli animali. Queste lezioni ci aiutano a capire la storia della Terra e la complessità dell'ecologia. Addirittura ispirano nuove tecnologie, tra cui nuovi design per velivoli. Le loro testimonianze fossili sono una finestra entusiasmante su un mondo perduto, pieno di mostri volanti. Gli pterosauri non erano solo estremi: erano straordinari. ■

PER APPROFONDIRE

On the Size and Flight Diversity of Giant Pterosaurs, the Use of Birds as Pterosaur Analogues and Comments on Pterosaur Flightlessness. Witton M.P. e Habib M.B., in «PLoS One», Vol. 5, n. 11, articolo n. e13982, novembre 2010.

The Wingtips of the Pterosaurs: Anatomy, Aeronautical Function and Ecological Implications. Hone D.W.E, Van Rooijen M.K. e Habib M.B., in «Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology», Vol. 440, pp. 431-439, dicembre 2015.

***Cryodrakon boreas*, Gen. et Sp. Nov, a Late Cretaceous Canadian Azhdarchid Pterosaur.** Hone D.W.E., Habib M.B. e Therrien F., in «Journal of Vertebrate Paleontology», articolo e1649681, pubblicato on line il 9 settembre 2019.

I giganti del cielo. Ksepka D.T. e Habib M., in «Le Scienze» n. 574, giugno 2016.

BIOLOGIA

Fotosintesi da corsa

Migliorare l'efficienza di questo processo è una delle strategie seguite per aumentare le rese delle coltivazioni in un mondo sempre più affollato. Ma la strada per il successo è piena di ostacoli

di Renato Bruni

VCG/Stringer/Getty Images

Renato Bruni è direttore scientifico dell'Orto Botanico dell'Università di Parma. Il suo quarto libro è *Bacche, superfrutti e piante miracolose* (Mondadori, 2019). Da oltre dieci anni racconta on line le complesse relazioni tra esseri umani e piante con il blog Erba Volant.

Nei bar più ruspanti dell'Emilia si racconta ancora la leggenda dell'implacabile utilitaria che ai tempi del boom economico umiliava le auto sportive sull'Autostrada del Sole. Le sorprendeva alle spalle, le incalzava in corsia di sorpasso e quando cedevano perplesse, rombava via in una sprezzante nuvola di povere. Il mito narra di un motore Ferrari (o Lamborghini, a seconda dei bar) impiantato su una Cinquecento, creando un bolide dal rapporto spropositato tra peso e potenza, da guidare sperando che telaio, freni e trasmissione reggessero sollecitazioni per cui non erano stati progettati. Oggi queste trasformazioni prendono il nome di *tuning*, e uniscono due categorie di smanettoni con insospettabili punti in comune: meccanici e ricercatori che fondono ingegneria e biologia molecolare. Tra le imprese più ardue intraprese dai secondi vi è il tuning della fotosintesi clorofilliana per affrontare un rilevante problema futuro: disporre di calorie sufficienti a sfamare una popolazione globale che nel 2050 potrebbe sfiorare i 10 miliardi, circa il 30 per cento in più di oggi.

Secondo le stime, per alimentare tutti le rese agricole dovrebbero aumentare tra il 50 e l'85 per cento e un ettaro di campo coltivato a riso, che nel 2010 sfamava 27 persone, dovrebbe metterne a tavola 43. Ovvero, la nostra macchina agricola dovrebbe essere spinta da un motore con un'accelerazione superiore al 2 per cento annuo; se guardiamo indietro, la produttività è cresciuta del 135 per cento tra il 1960 e il 2005 grazie a innovazioni genetiche, tecnologiche e agronomiche messe letteralmente in campo dalla rivoluzione verde. Sarebbe un andamento compatibile con i fabbisogni futuri, ma quella progressione non è più raggiungibile usando le stesse marce scalate finora e già da tempo ha perso brio: nei paesi produttori di riso, uno dei cereali più produttivi e alla base dell'alimentazione di quasi metà della popolazione mondiale, la resa per ettaro è cresciuta del 36 per cento tra il 1970 e il 1980, ma solo del 7 per cento tra il 2000 e il 2010. Traiettorie analoghe si riscontrano per altre fonti di amido come grano e patate e, volendo far correre la nostra macchina agricola, dobbiamo individuare strategie diverse da quelle seguite finora.

Perfettamente difettosa

Per le piante coltivate, l'equivalente della velocità è descritto dalla cosiddetta equazione di Monteith, il cui risultato coincide con la biomassa potenzialmente ottenibile per ettaro. Fu definita negli anni settanta da un fisico britannico votato allo studio degli effetti di ambiente, luce e meteorologia sulle rese agricole, e al suo interno operano tre diverse efficienze: cattura di luce utile, accumulo selettivo e resa fotosintetica, ovvero la conversione della luce in biomassa. Questi parametri hanno riferimenti precisi. Per esempio l'accumulo selettivo implica individuare varietà di patate che accumulino l'energia in eccesso in tuberi più grossi e ricchi di amido anziché investire il surplus in fusti e foglie più grandi, che non sono commestibili. Il prodotto delle tre efficienze è poi moltiplicato per un coefficiente legato alla radiazione solare disponibile nella zona di coltivazione. Si tratta di una formula tarata sulle esigenze umane, e pur tenendo in conto i limiti biologici di ciascun processo, vede la pianta come una macchina da calorie e non ne misura l'idoneità alla sopravvivenza, ma il rendimento.

Negli ultimi settant'anni e durante la rivoluzione verde abbiamo massimizzato due dei tre processi: cattura della luce e accumulo mirato, che hanno garantito lo sprint del 135 per cento. Questo ha assicurato un maggiore accesso al cibo, pur con innegabili asimmetrie, poiché alcune specie hanno goduto di scatti più intensi: tra il 1960 e il 2010 la resa del frumento è aumentata del 170 per cento, mentre nella cassava, principale fonte di calorie per l'Africa subsahariana, ci si è fermati al 60 per cento. Il problema però è che quei due parametri li abbiamo ormai spremuti, e anche limandoli ulteriormente gli zerovigola dei benefici saranno insufficienti, sebbene alcuni recenti prove di campo abbiano mostrato aumenti di resa in mais GM pari al 5-10 per cento grazie a un aumento della superficie fogliare. Resta l'ultima efficienza, quella della resa fotosintetica, che fortunatamente è lontana dai suoi limiti teorici, stimati in 9,4 per cento e 12,3 per cento a seconda di due diverse tipologie di fotosintesi possibili e corrispondenti alla percentuale massima di energia luminosa convertibile in biomassa. Purtroppo, se questa resa è rimasta ferma o quasi è perché metterci mano è sì indispensabile ma anche difficile, costoso e dagli esiti incerti.

Ragionando con la mente del meccanico, finora abbiamo lavorato sulla trasmissione e sulla distribuzione trascurando la potenza del motore, anche perché sprovvisti di strumenti idonei. Varie parti dell'intricatissima dinamica di scambi, ricicli, detossificazioni, spinterogeni, valvole e flussi, che nelle cellule vegetali combinano luce, anidride carbonica e acqua fino a ottenere il prodotto finale della fotosintesi, ovvero il glucosio e da questo l'amido, sono ancora poco chiare. Realizzare una versione vegetale della Cinquecento con motore Ferrari implica aggirare una serie di ostacoli noti, dettati dalla natura stessa della fotosintesi e particolarmente ostici per motivi solo apparentemente banali: mentre le automo-

IN BREVE

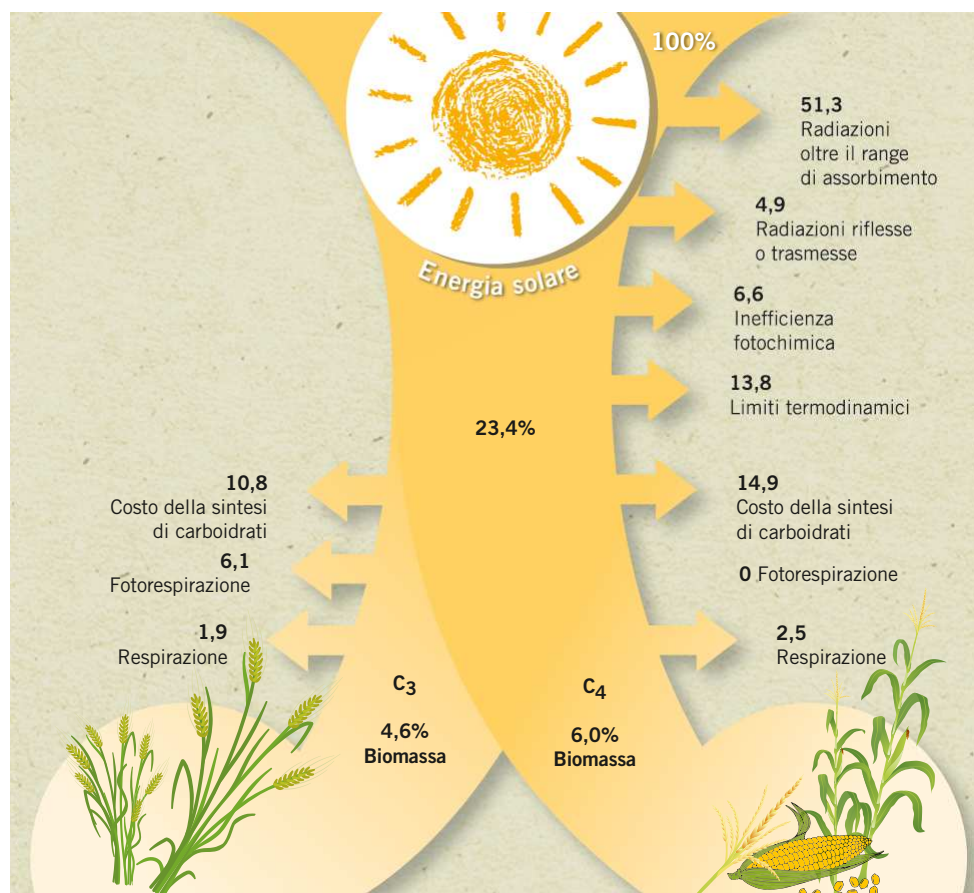
Nel prossimo futuro, per sfamare tutta la popolazione mondiale sarà necessario anche aumentare di parecchio la resa delle coltivazioni, in modo simile a quello che è stato fatto nella rivoluzione verde.

Una delle strategie seguite punta a rendere molto più efficiente la fotosintesi clorofilliana, ovvero il processo che nelle piante converte la luce del Sole in biomassa.

Le vie disponibili per truccare la fotosintesi sono varie, e nell'ultimo decennio sono state tutte battute, ma i risultati ottenuti in serre e laboratori sono lontani da quelli ottenuti nei campi coltivati.

Questa strategia quindi è ancora in una fase precoce, nonostante sporadici proclami. E per migliorare il motore della fotosintesi sarà necessaria un'estesa opera di ingegneria genetica, con tutte le discussioni del caso.

Un processo inefficiente

100%
Energia solare
51,3 Radiazioni oltre il range di assorbimento
4,9 Radiazioni riflesse o trasmesse
6,6 Inefficienza fotochimica
13,8 Limiti termodinamici
23,4%
10,8 Costo della sintesi di carboidrati
6,1 Fotorespirazione
1,9 Respirazione
14,9 Costo della sintesi di carboidrati
0 Fotorespirazione
2,5 Respirazione
C_3
4,6% Biomassa
C_4
6,0% Biomassa

Vista con gli occhi umani, la fotosintesi è un processo inefficiente, ovvero la conversione complessiva in biomassa dell'energia solare raramente supera il 6 per cento. I passaggi critici sono noti, e dipendono dai compromessi evolutivi che le piante devono soddisfare: la fotosintesi non ha finalità produttive ma deve contribuire alla sopravvivenza in un ambiente, inoltre gli organismi viventi non «progettano» per obiettivi specifici.
Il calo del rendimento è in parte comune a tutti i vegetali, però c'è una differenza rilevante tra le specie dette C3 e C4; dopo aver operato sugli stadi comuni, ora i ricercatori stanno lavorando sui benefici delle seconde per ottimizzare le rese di campo delle prime.

Danilo Sossi (*illustrazione*); fonte: *Climate-smart crops with enhanced photosynthesis*, di C. Jansson e altri, in «Journal of Experimental Botany», Vol. 69, n. 16, pp. 3801-3809, 18 luglio 2018.

bili possono essere riprogettate *ex novo* per soddisfare nuove esigenze, nelle piante dobbiamo scendere a patti con quello che l'evoluzione ci mette a disposizione, e mentre le strade le possiamo costruire dritte e lisce per andare più veloci, l'ambiente di un campo agricolo è pieno di curve e di insidie.

La fotosintesi si è evoluta stratificando uno sull'altro tratti ideali a garantire la vita ma non necessariamente a massimizzare la produttività, imponendo una serie di compromessi integrati tra loro senza avere l'equazione di Monteith come guida. Questo si traduce in dispersioni che qualunque meccanico o ingegnere umano definirebbe, dalla sua prospettiva imperniata sulla prestazione, gravi difetti di progettazione. Per esempio, nel migliore dei casi la fotosintesi trasforma in biomassa solo il 6 per cento di tutta l'energia solare disponibile e i rivoli in cui questa si disperde sono infiniti: luce non catturata, energia smarrita, limiti termodinamici, sistemi di fotoprotezione e ricicli indispensabili per rimediare ai limiti del complesso enzimatico noto come ribulosio-1,5-bisfosfato carbossilasi/ossigenasi, o RuBisCO (*si veda il box in questa pagina*). Nell'insieme di eventi che regola l'evoluzione e la vita questo ha un valore limitato, ma per un meccanico è come avere 100 cavalli nel motore e farne arrivare alle ruote solo 6: non ci superi molte macchine in autostrada.

Tra i molti enzimi coinvolti, uno risulta critico per la sua nota inefficienza e per le perdite che determina, ed è il già citato RuBisCO. Il suo primo limite è una lentezza 1000 volte superiore rispetto agli altri sistemi enzimatici e il secondo è la scarsa selettività: quasi una volta su cinque si sbaglia, confondendo l'anidride carbonica (CO_2) con una molecola di ossigeno (O_2), generando sostanze non solo inutili ma anche tossiche per le cellule (*si veda il box a p. 50*). Addirittura, in caso di calore e siccità RuBisCO può sbagliarsi quasi una volta su due. Si tratta di una conseguenza della sua comparsa in epoche geologicamente molto lontane, come il pre-Cambriano di un miliardo di anni fa, durante le quali l'ossigeno era scarso e trovarselo tra i piedi era poco probabile, mentre ora si trova nell'aria al 21 per cento. Per compensare la sua inefficienza, le piante producono quantità enormi di RuBisCO, che di fatto corrisponde al 30-50 per cento di tutte le proteine vegetali, e se fosse possibile sostituirlo o renderlo più efficace con un approccio da ingegnere, il rendimento della Cinquecento fotosintetica potrebbe avvicinarsi a quello di un'auto più sportiva.

Tra RuBisCO di piante diverse si osserva una certa biodiversità, che tuttavia non può essere sfruttata con le stesse strategie vincenti seguite da agronomi e genetisti durante la rivoluzione verde. Le versioni più veloci e quindi più efficienti nel processare l'anidride carbonica sono anche più sbadate, viceversa quelle più precise sono più lente, in un proverbiale caso di incompatibilità tra presto e bene.

La diversità biologica entra invece in gioco con la comparsa di

sistemi in grado di limitare i danni e recuperare parte dell'energia spesa per gestire gli errori. Queste soluzioni biochimiche hanno forme e modalità differenti tra alghe, cianobatteri e anche tra piante di famiglie diverse. Una prevede di aumentare la concentrazione di anidride carbonica nei pressi di RuBisCO, per tenere lontano l'ossigeno e ridurre il rischio di errore; si tratta della soluzione che con modi diversi è stata adottata dai cianobatteri, un gruppo batteri capaci di compiere la fotosintesi, e da alcune piante terrestri chiamate piante C4. In altre, chiamate piante C3, interviene invece un sistema di riparazione noto come fotorespirazione, che oltre a limitare i danni recupera circa il 75 per cento della CO_2, consumando però fino al 30 per cento dell'energia fotosintetica in piante come soia e grano. In caso di caldo e siccità, questo consumo sale fino al 50 per cento. Le varianti sono tuttavia impossibili da inserire nelle piante coltivate mediante selezione tradizionale, e vent'anni di ricerca hanno sancito inequivocabilmente che il miglioramento dell'ultimo coefficiente di Monteith può avvenire solo con la biologia sintetica e il pesante ricorso a tecniche per OGM (*si veda il box a p. 52*). Per farla correre più forte, insomma, dobbiamo rifare in qualche modo il motore della fotosintesi.

UNA FUNZIONE AMBIGUA

Due vie per un enzima

La fotosintesi impiega l'enzima più abbondante della Terra, RuBisCO, per fissare il carbonio atmosferico nel ciclo di Calvin. La sua funzione è ambigua e, partendo come RuBP, può confondere CO_2 con O_2, avviando un percorso svantaggioso che peggiora al caldo e a cui alcuni vegetali rimediano con la fotorespirazione, che ha un costo energetico e recupera solo parte della CO_2 in forma di 3-fosfoglicerato, o PGA, indispensabile per il glucosio (PG indica il 2-fosfoglicerato). Specie C4 come mais, canna da zucchero e sorgo hanno invece un sistema che evita la fotorespirazione e assicura rendimenti migliori, che si cerca di implementare in piante come grano e legumi per aumentarne le rese.

Danilo Sossi su indicazione dell'autore

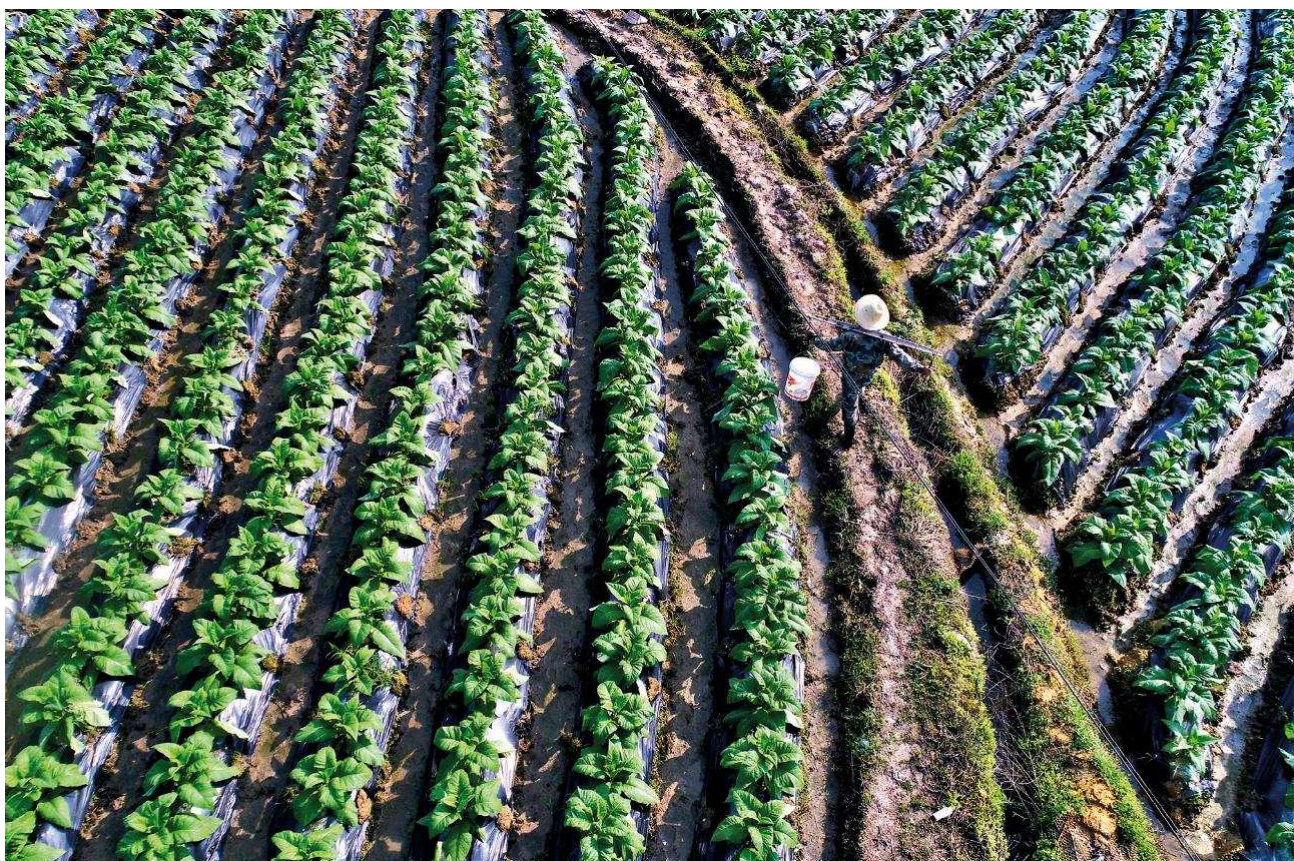
La testa dentro al cofano

Le vie disponibili per truccare la fotosintesi sono varie e tutte battute nell'ultimo decennio, con alterne fortune. Si può aiutare RuBisCO a non sbagliare aggiungendo carburatori biochimici che arricchiscono di CO_2 i dintorni dell'enzima, si può rendere più risparmiosa la fotorespirazione o addirittura eliminarla impiantando sistemi derivati da altri organismi, anche microbici. Si può migliorare la ripresa della fotosintesi, che vanta un efficace sistema per proteggere dalla luce eccessiva gli organelli cellulari preposti alla fotosintesi, chiamati cloroplasti. Il sistema è però lentissimo a rimettersi in moto quando la macchina si ferma.

Può sembrare paradossale, ma uno degli approcci seguiti prevede di ridurre il sistema fotosintetico sia nelle dimensioni sia nella quantità. Si è visto che strutture più snelle, proprio come le carrozzerie più aerodinamiche, migliorano la prestazione. La fotosintesi si basa su una squadra di varie molecole, tra cui il pigmento chiamato clorofilla e alcuni carotenoidi, che oltre a diventare evidenti nella colorazione delle foglie autunnali intervengono nelle prime fasi di cattura della luce, agendo come antenne in grado di captare un segnale luminoso. L'uso di squadre molecolari più snelle, chiamate *truncated light-harvesting antenna*, ha permesso di aumentare la biomassa grazie a una migliore distribuzione della luce. Se non è captata in eccesso dalle antenne più esterne, la luce permea verso cloroplasti e foglie più distanti dalla fonte luminosa impedendo così la saturazione dei cloroplasti più esposti. Per esempio, produrre piante con sistemi fotosintetici più snelli ha incrementato il processo del 30 per cento nella soia e del 40 per cento nel riso, almeno in laboratorio.

Le prestazioni di un'auto non si limitano però alla velocità massima, ovvero da sempre la ripresa è un fattore discriminante tra utilitarie e sportive e il «da zero a cento» vale anche per le piante. In pieno Sole, le piante assorbono più luce di quella che possono gestire, e l'eccesso può innescare particolari reazioni chimiche, dette radicaliche, nocive per i cloroplasti. I loro danni sono mitigati da un processo limitatore chiamato *quenching* non fotochimico, o NPQ, che disperde l'energia in eccesso in forma di vibrazioni molecolari, ovvero calore. Si tratta di una sorta di circuito di raffreddamento al contrario, che riscalda per evitare che il motore della fotosintesi si bruci, ma che al contempo la mette in pausa.

Ovviamente ha un costo, e dirotta le radiazioni elettromagnetiche in una direzione improduttiva; ma soprattutto, mentre l'innesco in caso di luce intensa è rapidissimo, il ritorno alla massima efficienza durante il passaggio di una nuvola o quando il vento sposta all'ombra una foglia richiede vari minuti, durante i quali quella parte non produce quanto potrebbe. Questa ripresa da trattore limita la possibilità di operare a tutto gas, quindi i ricercatori sono all'opera per ridurne gli effetti. Si ritiene che alle condizioni delle medie latitudini il fenomeno riduca la resa fotosintetica fino al 30 per cento e che invece potrebbe essere possibile limitare questa perdita al 10 per cento. Usando il tabacco, sono stati messi a punto sistemi ingegnerizzati per esprimere geni coinvolti nella sintesi di carotenoidi attivi nel processo NPQ, come zeaxantina e violaxantina, portando a un aumento della biomassa del 20 per cento in laboratorio e del 15 per cento in condizioni reali di campo grazie a una ripresa più fulminea dallo stato inibito.

Anche la fotorespirazione è tradizionalmente considerata un processo da minimizzare per migliorare la resa delle piante C3 e la sua assenza un vantaggio nelle C4. Visto con gli occhi di un meccanico attento alla prestazione, il suo costo è enorme: solo nel Midwest degli Stati Uniti ogni anno si perdono oltre 300 miliardi di miliardi di calorie in forma di amido non prodotto a causa dei limiti fotosintetici, mentre ridurre la fotorespirazione anche solo del 5 per cento garantirebbe nella stessa zona aumenti di resa per ettaro traducibili in un guadagno economico di circa 500 milioni di dollari. Sistemi come quelli delle piante C4 sono alla base delle due percentuali citate riguardo al massimo teorico dell'efficien-

Pianta modello. Coltivazione di tabacco a Tancheng, un villaggio nella contea cinese di Yongfeng, nella provincia dello Jiangxi. Il tabacco è tra le piante usate più comunemente negli esperimenti che cercano di individuare interventi sulla fotosintesi con cui aumentare le rese delle coltivazioni.

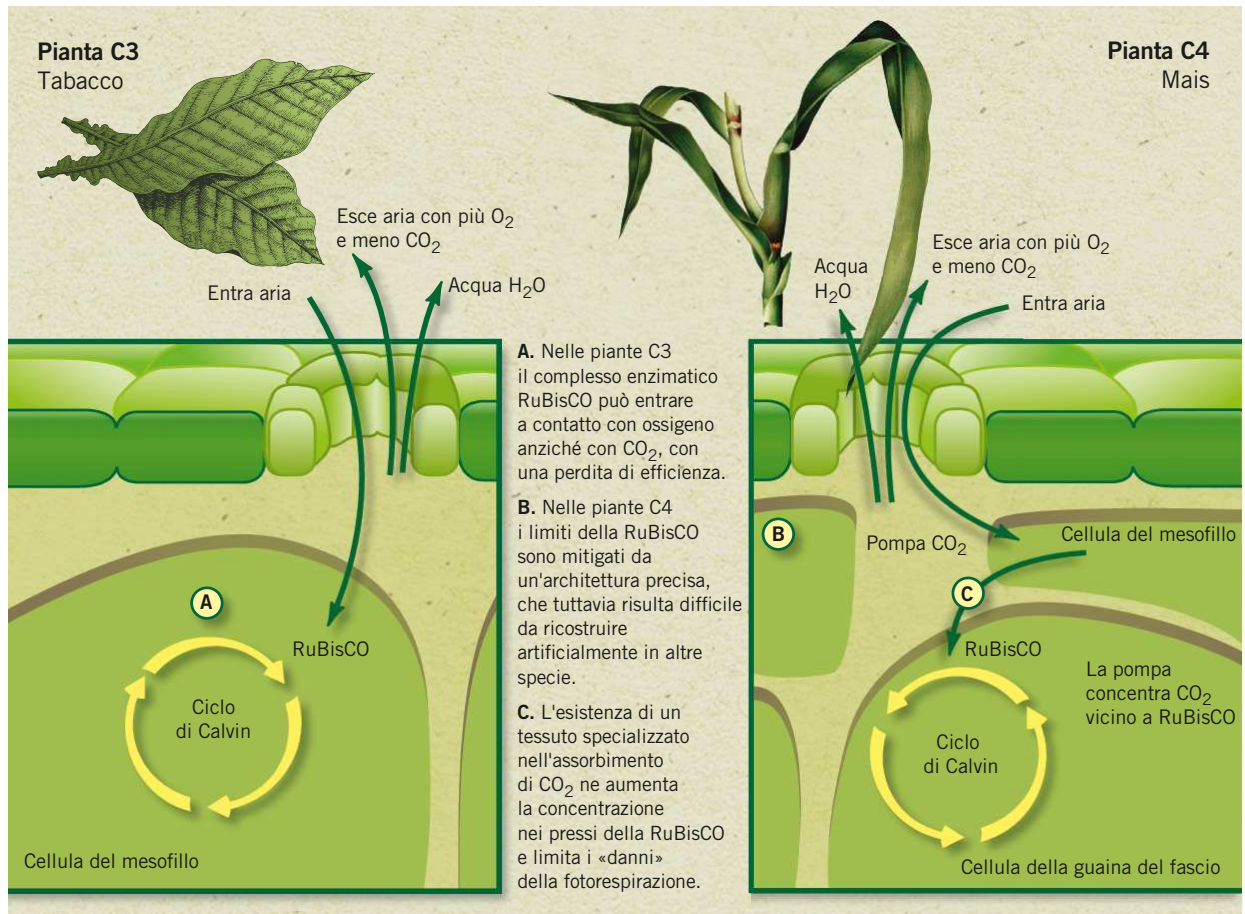
VCG/Getty Images

za fotosintetica secondo Monteith. Infatti, 9,4 per cento è il limite delle «utilitarie» C3 come riso e grano mentre 12,3 per cento è quello per le C4 come mais e canna da zucchero. Finora gli esiti del tuning sulla fotorespirazione sono stati alterni, suggerendone una completa ricostruzione tramite l'installazione di sistemi alternativi e meno energivori, e ipotizzando la necessità di soluzioni diverse in base alla specie da trasformare e al luogo di coltivazione.

Per esempio, l'espressione nel tabacco di proteine altrimenti assenti, e in grado di assorbire l'ossigeno prima che possa essere catturato da RuBisCO, ha dato risultati incoraggianti con un aumento della resa di campo fino al 50 per cento. L'introduzione di complessi enzimatici che aggirano il sistema endogeno fornendo smaltimenti più economici ha funzionato anche nelle patate e in *Camelina sativa*, una pianta i cui semi sono usati come fonte di olio, in cui è stata espressa la possibilità di produrre una complessa proteina solitamente presente nel batterio *Escherichia coli*. Nel primo caso la presenza di zuccheri è aumentata di quattro volte con raddoppio della resa in tuberi e nell'altro la resa in semi è cresciuta del 70 per cento. Questo però è avvenuto in condizioni che potrebbero non essere ottenibili in campo e diverse prove suggeriscono che inibire o alterare la fotorespirazione potrebbe non necessariamente portare a benefici complessivi fuori da serre e laboratori.

In condizioni critiche di siccità, salinità e calore tipiche di un campo e sempre più frequenti per effetto del cambiamento climatico, la fotorespirazione non funge solo da riciclo dei rifiuti di RuBisCO ma detossifica anche i radicali liberi generati dallo stato di stress. Per vari ricercatori una sua eliminazione potrebbe garantire buoni risultati nelle comode mura dei laboratori o delle fattorie verticali, ma rivelarsi critica nella complessità agricola obbligando a testare queste piante a lungo nelle precise zone di coltivazione prima di ipotizzarne un impiego pratico.

Ulteriori vie prevedono di ricreare artificialmente in piante C3 soluzioni già premiate dall'evoluzione, come i meccanismi di concentrazione di CO_2. La strada è in teoria promettente e prevede l'inserimento in tabacco o riso di nuove strutture come i β-carbossisomi dei cianobatteri. Si tratta di un'operazione non elementare, perché serve mettere nel cofano delle piante un componente non previsto dalla biologia vegetale – un involucro proteico che racchiude RuBisCO, sistemi di trasporto e altri enzimi – destinato a mantenere alta la concentrazione di CO_2 al suo interno, agevolando il legame tra questo gas e precursori del glucosio, rendendo superflua la fotorespirazione. Anche in questo caso ai successi ottenuti in laboratorio dalla biologia sintetica si contrappone un limite pratico: le piante modificate di tabacco finora ottenute hanno resa maggiore solo in un'atmosfera ricca di CO_2, non riproducibile in condizioni di campo. L'avvento della biologia sintetica, però, permette di realizzare soluzioni biologiche nuove. Questo inizia a far ipotizzare l'ottenimento di un «neo-RubisCO», ingegnerizzato per renderlo meno prono all'errore, sebbene l'operazione sia ritenuta possibile dalle simulazioni ma poco implementata delle cellule. Uno scoglio risiede nei geni necessari alla codifica di RuBisCO, che sono in parte nel DNA che si trova nuclei delle cellule vegetali e in parte nel particolare DNA contenuto nei cloroplasti, cosa che impone più trasformazioni simultanee.

Due cicli a confronto

Un'ipotesi di lavoro per portare le piante C3 verso le prestazioni delle loro omologhe C4 consiste nel trasferire in esse il sistema che ovvia ai limiti di RuBisCO e supera i costi della fotorespirazione. Le differenze tra le due categorie però riguardano anche aspetti strutturali, oltre che biochimici, e includono una diversa architettura nei tessuti fogliari, necessaria a concentrare CO_2 nei pressi dell'enzima inefficiente abbattendo il rischio che incontri O_2. Questo rende ostica la trasformazione del motore fotosintetico: agronomia classica e OGM di prima generazione non sono sufficienti, rendendo inevitabile il ricorso alla biologia sintetica.

Il procedimento più drastico e sulla carta più remunerativo (e quindi più finanziato da enti, governi e fondazioni) è mettere davvero nelle piante C3 il motore delle C4, producendo per esempio un riso con l'efficienza del sorgo nell'uso di luce, acqua e suolo. Le stime ipotizzano rese per ettaro maggiori del 50 per cento. Creare un'utilitaria motorizzata Ferrari richiede però uno sforzo enorme, perché le parti su cui intervenire coinvolgono anche la carrozzeria oltre al vano motore e passare dalla teoria alla pratica si è rivelato finora molto complicato.

La fotosintesi delle piante C4 beneficia della pre-concentrazione di CO_2 e prevede una precisa disposizione di cellule specializzate poste in prossimità di quelle fotosintetiche. Le piante C4 hanno peculiarità come la cosiddetta anatomia Kranz, un'architettura in cui le cellule specializzate nella fotosintesi sono a contatto diretto con un tessuto specializzato nell'assorbimento di anidride carbonica. Le cellule di quest'ultimo hanno pareti più spesse e una minore esposizione agli spazi intercellulari e limitano l'uscita di anidride carbonica, inducendone la concentrazione in prossimità di RuBisCO e aumentandone l'efficacia.

Dopo 25 anni di studio e nonostante l'enorme mole di scoperte ottenuta da queste ricerche, le esigenze necessarie a installare il sistema C4 nelle piante C3 sono ancora oscure. Per ora è stato possibile ottenerne una forma rudimentale nel riso, inserendo una parte dell'armamentario biochimico delle piante C4 e compiendo un primo passo fondamentale ma incompleto, poiché le piante così modificate continuano a operare quasi solo con la fotosintesi originaria. Per rendere operativa la trasformazione servirebbe ingegnerizzare anche la parte anatomica, creando ex novo intere architetture. Però non conosciamo ancora tutti i geni coinvolti nella produzione di queste strutture e si sospetta che potrebbero essere varie decine, con ovvi limiti allo sviluppo artificiale del processo. Per superare questo collo di bottiglia potrebbe essere utile una variante naturale, presente in alcune Chenopodiacee dei generi *Bienertia* e *Suaeda*, in cui l'anatomia Kranz è prodotta da comparti-

menti separati in una singola cellula. Ma in questo caso il manuale genetico di istruzioni indispensabile per spostare il motore da una pianta all'altra ci è in gran parte ignoto, quindi il percorso è ancora agli albori.

Tra 15 anni

Nonostante gli aumenti di resa a due cifre non abbiamo ancora campi coltivati con fotosintesi da corsa e tutti i ricercatori seri parlano di tecnologie disponibili non prima di 15 anni. I loro colleghi attivi sul tema dieci anni fa, però, facevano le medesime previsioni. Questo ha ragioni precise, che non vanno trascurate. La fotosintesi è un cardine in un equilibrio fluttuante la cui logica non è la resa per ettaro, ma la sopravvivenza in un ambiente. Tecnologie non integrate con il contesto reale rischiano di produrre splendidi progetti che raramente arrivano allo stadio di prototipo o prototipi ottimi nella galleria del vento destinati poi a cadere alla prova dei fatti. Solo da pochi anni abbiamo verificato quanto distanti siano i risultati ottenuti in laboratori e serre rispetto alla prestazione nella pista dei campi coltivati.

Per esempio, la sola variazione di densità porta le piante a crescere del 30 per cento in meno in campo e un grado di temperatura notturna in più si traduce in una perdita della resa alimentare del 10 per cento nel riso, falciando i progressi stimati in laboratorio e spesso raccontati come definitivi al lettore meno esperto. Inoltre si lavora su piante modello scelte per la loro facile gestione: nel tabacco per esempio la biomassa è calcolata su foglie e fusto e non su semi, frutti e tuberi ricchi di amido; inoltre è facilmente manipolabile, mentre i cereali non sono altrettanto docili. Per quanto le rese siano calcolate rispetto a controlli, è fisiologico riscontrare che molti tentativi promettenti non si traducano in successi reali, eppure sovente queste scoperte sono narrate con un tono definitivo.

Come ogni grande impresa della ricerca, anche il tuning della fotosintesi impone riflessioni non solo scientifiche

Anche l'ambiente ha un peso spesso trascurato. I consumi sono fattori limitanti per avere una vettura efficace: se il motore costringe a rifornimenti ogni 50 chilometri, il tempo guadagnato con la velocità si azzera in un viaggio. Iniziano per esempio a comparire previsioni di impatto minimo della fotosintesi aumentata ovunque l'ambiente non sarà ottimale in termini di suolo fertile, temperatura e soprattutto acqua. Tutti elementi in prospettiva critici in virtù del riscaldamento globale. Inoltre, recenti valutazioni sull'intero ciclo di vita di queste piante mostrano un maggiore accumulo di biomassa all'inizio della stagione vegetativa, quando l'acqua piovana è abbondante, a cui corrisponde un più rapido esaurimento delle riserve idriche nel suolo che inficia la crescita successiva. L'esito è un calo dell'accumulo di biomassa proprio nel periodo più importante per noi, in cui si sviluppano frutti e radici obbligando, come un motore assetato, a maggiori irrigazioni che in futuro potrebbero non essere sempre agevoli.

Come ogni grande impresa della ricerca, anche il tuning della fotosintesi impone riflessioni non solo scientifiche. Per ora tutte le piante ottenute a questo fine non potrebbero essere coltivate ovunque (in alcuni casi neppure sperimentate in campo, come in Italia) perché sottoposte ai vincoli per gli OGM, eppure secondo tutti gli studi questo è l'unico approccio possibile per superare il limite attuale dell'equazione di Monteith e aumentare le rese in modo coerente con l'incremento demografico. Sicuramente non possiamo correre il rischio di giungere al 2050 senza aver fatto tutto il possibile per ottimizzare le rese agricole e l'aumento dell'efficienza fotosintetica è una strada da percorrere obbligatoriamente anche ragionando su normative adeguate.

Ma al tempo stesso vanno mitigate narrazioni che generino false promesse o descrivano questa come l'unica salvifica via rispetto ai problemi di crisi ambientale e demografica a cui andiamo incontro. Riduzione di emissioni e sprechi, salvaguardia ecologica, strategie di distribuzione uniforme del cibo, adeguamento delle diete alla sostenibilità ambientale e tuning della fotosintesi devono proseguire in parallelo, non concorrere tra loro. Sarebbe un peccato non farlo, anche solo osservando l'equazione di Monteith: una volta ottimizzato l'ultimo coefficiente entro il 2050, i margini di miglioramento per sostenere una popolazione mondiale nel frattempo cresciuta con lo stesso modello attuale sarebbero prossimi a zero.

Sebbene la strada sia lunga e impervia, iniziano a giungere risultati più solidi e incoraggianti, che portano nei campi le sperimentazioni di biologia sintetica ridisegnando più passaggi della fotosintesi. A inizio 2019 è stato mostrato l'ultimo prototipo, un tabacco in cui modifiche al DNA dei plastidi hanno portato, in campo e per più anni, a un aumento di biomassa del 25 per cento con un'efficienza fotosintetica maggiore del 17 per cento e un 40 per cento in più di amido. L'operazione ha previsto la modifica simultanea di sette geni, inserendo enzimi derivati da *E. coli*, zucca e *Arabidopsis* in grado di produrre una fotorespirazione più economica, con l'aggiunta dell'enzima glicolato deidrogenasi usata dall'alga *Chlamydomonas reinhardtii,* per evitare la produzione di perossido di idrogeno durante il processo. Nel complesso il sistema funziona in analogia al recupero dell'energia cinetica chiamato KERS impiegato nelle auto da corsa: prende energia persa nella fotorespirazione e la fa convergere sulla fotosintesi. Il nuovo percorso supera il semplice aumento di resa fotosintetica: l'assimilazione di CO_2 cresce del 5-8 per cento mentre l'aumento di biomassa corrispondente è del 24-40 per cento. Resta da vedere se gli stessi risultati saranno ripetibili su specie meno malleabili ma più utili al fabbisogno alimentare e se lo stesso beneficio sarà riscontrabile in frutti, semi e tuberi di soia, patate e cereali.

Per adesso dobbiamo prendere atto che molte allettanti ipotesi per il tuning della fotosintesi sono ancora in una fase precoce e che sarà necessaria un'estesa opera di ingegneria genetica per mettere il motore della migliore fotosintesi nel cofano delle piante coltivate. Anche per questo motivo un'avventura scientifica e tecnologica simile va sostenuta, ma con la consapevolezza che non deve trasformarsi in una scommessa su cui puntare tutte le *fiches*. ■

PER APPROFONDIRE

Quantifying Impacts of Enhancing Photosynthesis on Crop Yield. Wu A., e altri, in «Nature Plants», Vol. 5, n. 380, pp. 380-388, 8 aprile 2019.

Synthetic Biology Approaches for Improving Photosynthesis. Kubis A. e Bar-Even A, in «Journal of Experimental Botany», Vol. 70, n. 5, pp. 1425-1433, 15 febbraio 2019.

Improving Crop Yield. Eisenhut M. e Weber A.P., in «Science». Vol. 363, pp. 32-33, n. 6422, 4 gennaio 2019.

Meeting the Global Food Demand of the Future by Engineering Crop Photosynthesis and Yield Potential. Long S.P. e altri, in «Cell», Vol. 161, n. 1, pp. 56-66, 26 marzo 2015.

Obesità
e
cervello

Secondo alcune ricerche, i cibi «ultraprocessati» scatenerebbero segnali neurali che stimolano ulteriormente l'appetito, a differenza di altri alimenti della dieta occidentale

di Ellen Ruppel Shell

Fotografie di Jamie Chung

Ellen Ruppel Shell è docente di giornalismo scientifico all'Università di Boston e autrice di *The Job: Work and Its Future in a Time of Radical Change* (Crown Publishing, 2018). Scrive spesso di questioni mediche ed è autrice di *The Hungry Gene: The Inside Story of the Obesity Industry* (Grove Press, 2002).

Parlando del suo settore, caratterizzato da frequenti e profonde controversie, lo studioso ed esperto di nutrizione Kevin Hall cerca di mantenere un atteggiamento distaccato, dicendosi più divertito che frustrato dalla tendenza di alcuni suoi colleghi di «rimanere attaccati alle loro teorie preferite anche di fronte a dimostrazioni inconfutabili della loro fallacia».

Alcuni di questi esperti, mi dice con un sorriso malizioso, «hanno la strabiliante capacità di razionalizzare i risultati degli studi che li smentiscono»

Tra questi c'è anche l'idea che alcuni nutrienti, come i grassi, i carboidrati o gli zuccheri, siano i colpevoli dell'allarmante pandemia di obesità (secondo l'Organizzazione mondiale della Sanità, la percentuale di persone obese nel mondo è quasi triplicata tra il 1975 e il 2016, un aumento che accompagna varie minacce per la salute, come le malattie cardiache e il diabete). Tuttavia Hall, che lavora al National Institute of Diabetes and Digestive and Kidney Diseases, dove è a capo del Dipartimento di fisiologia integrativa, ha condotto alcuni esperimenti che indicherebbero un altro colpevole. I suoi studi suggeriscono infatti che la responsabilità principale sia del modo in cui il cibo che mangiamo viene preparato, ovvero separando gli ingredienti e ricomponendoli in alimenti come le barrette o i pasti precotti surgelati. Secondo Hall e un numero crescente di scienziati, questi alimenti ultraprocessati alterano i segnali di sazietà che normalmente passano tra intestino e cervello, portando a un consumo eccessivo di cibo.

Hall ha condotto due studi piccoli ma estremamente rigorosi che contraddicono la diffusa convinzione che grassi o carboidrati siano i principali responsabili. In entrambi gli esperimenti ha ricoverato i partecipanti in ospedale per diverse settimane e monitorato attentamente ciò che mangiavano. L'idea era di aggirare gli errori dei classici studi sull'alimentazione che si basano su quanto riferiscono i partecipanti, che di rado corrisponde a ciò che hanno mangiato davvero. Il ricercatore, che ha un dottorato in fisica, ha la tipica inclinazione di quella disciplina per le misurazioni precise. Il suo primo studio ha riscontrato che, al contrario di molte previsioni, una dieta a basso consumo di carboidrati rallentava la perdita di grasso corporeo. Il secondo studio, pubblicato nel 2019, ha identificato una nuova ragione dell'aumento di peso, scoprendo che i partecipanti, lasciati liberi di scegliere che cosa mangiare, assumevano centinaia di calorie in più provenienti da cibi ultraprocessati rispetto a quelle dai non lavorati. I partecipanti che mangiavano cibi ultraprocessati aumentavano di 900 grammi in due settimane.

«Quello di Hall è uno studio seminale, equivalente ai migliori trial clinici in circolazione», ha affermato Barry M. Popkin, professore di nutrizione all'Università del North Carolina a Chapel Hill e studioso di alimentazione e obesità. «La sua ricerca è stata la prima a dimostrare che i cibi ultraprocessati non sono solo desiderabili, ma anche che le persone tendono a mangiarne di più». Lo studio è stato accolto con favore, anche se è possibile che l'esperimento controllato di Hall non sia applicabile al modo caotico in cui le persone mescolano i vari tipi di alimenti nella vita reale.

Lo stesso Hall afferma di non voler cambiare a tutti i costi le abitudini alimentari degli Stati Uniti; il ricercatore ammette che la passione di suo figlio (di 4 anni) per le crocchette di pollo e la pizza è incrollabile, e che la sua stessa dieta potrebbe essere migliorata. Tuttavia ritiene che il suo studio offra prove importanti che il principale colpevole dell'obesità non è un particolare gruppo di nutrienti, ma il modo in cui il cibo viene trattato dai produttori. Hall sottolinea di non avere nessun interesse a partecipare alle guerre sulle varie diete, ma di guardare semplicemente ai fatti: «Quando prendi una posizione e ti circondi dei pregiudizi selettivi di quella fazione, è difficile separarsene», dice. Poiché il suo laboratorio e le sue ricerche sono finanziati dall'istituto di ricerca di cui fa parte indipendentemente dai risultati, Hall ritiene di avere «la libertà di cambiare idea. Di fatto, ho l'immenso privilegio di lasciarmi convincere soltanto dai dati».

Il test dei carboidrati

Un tempo Hall propendeva per la teoria secondo cui alcuni nutrienti specifici (in particolare i carboidrati) sarebbero responsabili delle nostre sconfitte nella lotta contro il peso. «Sape-

IN BREVE

Molti esperti di nutrizione ritengono che la diffusione dell'obesità nel mondo sia dovuta al consumo eccessivo di grassi o carboidrati.

Tuttavia, alcuni studi indicano invece come responsabili i cibi ultraprocessati, come le crocchette di pollo e le zuppe istantanee, ormai onnipresenti nelle diete moderne.

Questi alimenti avrebbero la capacità di alterare i segnali che intercorrono normalmente tra l'intestino e il cervello per indicare lo stato di sazietà, facendo sì che le persone mangino in eccesso.

Styling di Amy Henry

I cibi e le bevande ultraprocessati sono pensati per essere pronti al consumo e contengono numerosi additivi, tra cui oli, grassi, esaltatori del colore e del sapore, dolcificanti non a base di zucchero e agenti compattanti e rassodanti. (Nessun marchio specifico è stato correlato all'obesità).

Fonte delle fotografie alle pagine 65 57 e 69: «Nova. The Star Shines Bright,» di Carlos A. Monteiro at al., In World Nutrition, vol. 7, no. 1; january–march 2016

vo che il consumo di carboidrati aumenta i livelli di insulina nel sangue e che questi sono coinvolti nell'accumulo di grasso e nelle cellule grasse», ha detto. «Era quindi plausibile che il consumo di carboidrati rispetto ad altri macronutrienti potesse avere un effetto dannoso sul peso corporeo. Plausibile, ma non certo; e dunque ho deciso di mettere alla prova questa teoria».

Nello studio di Hall sui carboidrati, 10 uomini e 9 donne, tutti obesi, sono stati temporaneamente sequestrati in un reparto ospedaliero dei National Institutes of Health, dove hanno ricevuto una dieta ricca di carboidrati e povera di grassi per due settimane. I partecipanti sono poi tornati a casa per un breve periodo e quindi riammessi in ospedale per altre due settimane. Per i primi cinque giorni di ogni permanenza, la percentuale di nutrienti somministrata era pari al 50 per cento di carboidrati, 35 per cento di grassi e 15 per cento di proteine, mentre gli apporti energetici erano proporzionali alla spesa energetica (misurata in una camera metabolica costruita appositamente) per garantire che non guadagnassero peso né lo perdessero. Nei sei giorni successivi di ogni soggiorno, la dieta era composta dal 30 per cento in meno di carboidrati.

«Non ci siamo stupiti nel riscontrare che quando si interviene sul livello di carboidrati rispetto ai grassi i livelli di insulina cambiano notevolmente», afferma Hall. Lo scienziato era infatti preparato a riscontrare una riduzione nei livelli di insulina nella dieta povera di carboidrati. «Quello che invece ci ha sorpreso è che i livelli di insulina particolarmente bassi non influenzassero in modo significativo la percentuale di calorie bruciate nel tempo o il grasso corporeo». In genere, una riduzione dei livelli di insulina colpisce il modo in cui le cellule grasse bruciano le calorie. Tuttavia, afferma Hall, «abbiamo riscontrato che la dieta con un apporto ridotto di carboidrati rallentava leggermente la perdita di grasso corporeo». Inoltre la dieta aumentava lievemente la perdita di massa magra. Un anno dopo Hall e colleghi hanno condotto un esperimento simile per un periodo più lungo, otto settimane. Questa volta i

carboidrati sono stati ridotti a livelli molto bassi. Al termine dell'esperimento gli studiosi non hanno riscontrato differenze significative nella perdita di grasso corporeo o nel consumo calorico tra la dieta a livelli minimi di carboidrati e una dieta di base con alto tasso di carboidrati e di zuccheri. Gli scienziati hanno pubblicato i loro primi risultati nel 2015 su «Cell Metabolism» e la seconda parte nel 2016 sull'«American Journal of Clinical Nutrition».

E quindi, se non sono i carboidrati, chi sono i responsabili del problema mondiale dell'obesità? Certo, oggi le porzioni dei pasti sono più grandi, il cibo è disponibile in abbondanza e molti di noi assumono più calorie di quanto non avvenisse decenni fa. Ma tutte queste tentazioni dovrebbero portare quasi tutti gli occidentali a mangiare troppo, e invece non è così. Questo, secondo Hall, è il vero mistero della nutrizione: quali fattori, in alcune persone, potrebbero ostacolare i meccanismi innati di sazietà che ci aiutano a tenere sotto controllo ciò che mangiamo?

Calorie elaborate

Hall ama paragonare gli esseri umani alle automobili, affermando che entrambi possono funzionare grazie a fonti di energia diverse. Nel caso delle auto, queste possono essere il diesel, la benzina ad alto contenuto di ottani o l'elettricità, a seconda della casa produttrice e del modello. Allo stesso modo, gli umani possono vivere (e di fatto lo fanno) seguendo un numero infinito di diete, a seconda delle abitudini culturali e di ciò che è facilmente reperibile. Per esempio una dieta ad alto contenuto di grassi e povera di carboidrati funziona bene per gli Inuit dell'Artico, mentre un'alimentazione tradizionale povera di grassi e ricca di carboidrati è ideale per i giapponesi. Tuttavia, se gli esseri umani si sono evoluti tanto da adeguarsi a una grande varietà di contesti alimentari naturali, in anni recenti la catena alimentare è cambiata in modo così profondo da far sì che i nostri geni (e i nostri cervelli) non abbiano avuto modo di adattarsi. E, cosa non sorprendente, ognuno di noi reagisce in modo diverso a questa sfida.

Alla fine dell'Ottocento la maggior parte degli statunitensi abitava in zone rurali, e quasi metà viveva grazie alle fattorie, in cui il cibo fresco o minimamente elaborato era la norma. Oggi gli americani vivono prevalentemente nelle città, e non producono più i loro alimenti ma li comprano sempre più sotto forma di cibi pronti. Le stime indicano che il 58 per cento delle calorie che consumiamo e quasi il 90 per cento di tutti gli zuccheri aggiunti provengono da formule alimentari industriali composte interamente o quasi di ingredienti non reperibili in natura in forma e combinazioni simili, che si tratti di nutrienti, fibre o additivi chimici. Sono gli alimenti ultraprocessati, che vanno dal cibo spazzatura – come le patatine, i cereali zuccherati per la prima colazione, le caramelle, le bibite gassate o i dolci industriali – fino ai prodotti in apparenza benigni o perfino salutari, come i pani di produzione commerciale, le carni trattate, gli yogurt aromatizzati e le barrette energetiche.

I cibi ultraprocessati, che tendono a essere molto ricchi di zuccheri, grassi e sale, hanno portato a un aumento di oltre 600 calorie disponibili al giorno per ogni statunitense dal 1970 in poi. Tuttavia, benché la diffusione di questi alimenti sia legata all'aumento di peso, una correlazione non è necessariamente una causa. Esistono svariati alimenti deliziosi e meno elaborati (formaggi, carni grasse, oli vegetali, panna) che potrebbero svolgere un ruolo equivalente se non più importante. Perciò Hall ha voluto verificare se esistesse qualche aspetto dei cibi ultraprocessati responsabile dell'aumento di peso. «In sostanza ci siamo chiesti se le persone consumano più calorie quando queste provengono da cibi ultraprocessati», racconta.

Non è semplice rispondere a questa domanda. Come osservato in precedenza, i classici studi sull'alimentazione si basano su ciò che riferiscono i partecipanti, a cui viene chiesto di conservare un diario alimentare o di compilare questionari basandosi sulla propria memoria. Ma Hall sapeva che nel caso dei cibi ultraprocessati questo approccio non avrebbe offerto prove convincenti. In primo luogo, è noto che chi partecipa agli studi sull'alimentazione ha la tendenza a mentire nei questionari, imbrogliando sulle quantità di broccoli rispetto a quelle dei biscotti consumati od «omettendo» di indicare le birre bevute con gli amici. Inoltre, considerata l'alta percentuale di cibi ultraprocessati nelle diete degli statunitensi, sarebbe stato difficile trovare un gruppo di persone con un'alimentazione nettamente diversa per fare un confronto.

Per aggirare questi e altri problemi, nel 2018 Hall è tornato al reparto di medicina metabolica, dove 20 volontari adulti hanno ricevuto in modo casuale una dieta a base di cibi ultraprocessati oppure non lavorati per due settimane. In seguito le persone si sono scambiate: chi aveva seguito una dieta le prime due settimane avrebbe seguito l'altra per altre due. Naturalmente, 20 non è un campione significativo da cui trarre conclusioni universali, ma lo studio pilota era inteso come una verifica su cui basare studi più ampi in futuro. Secondo Hall, sottoporre un numero più alto di persone a questo regime rigoroso a fini di studio in una fase così preliminare non sarebbe stato etico. I dietologi si sono assicurati che i pasti previsti dalle due diete fossero equivalenti in termini di calorie, densità energetica, grassi, carboidrati, proteine, zuccheri, sodio e fibre. Hanno inoltre verificato che i partecipanti non avessero preferenze per una categoria di cibi rispetto all'altra. In entrambe le diete, ai partecipanti è stato chiesto di mangiare a loro piacimento quanti spuntini e pasti desiderassero.

L'energia usata dal corpo dopo aver mangiato questi cibi non corrisponde alla percezione dell'energia ingerita, quindi il cervello si confonde

La scorsa primavera, nel suo ufficio, Hall mi ha mostrato alcune fotografie a colori di ogni pasto e spuntino. I pasti ultraprocessati comprendevano cibi come lattine di ravioli, hot dog, hamburger con formaggi elaborati, pane bianco, margarina e biscotti confezionati. La prima colazione di questa categoria prevedeva alimenti come pancetta di tacchino, cereali zuccherati, sostituti delle uova, crocchette di patate, bevande al sapore di frutta (quasi tutte zuccherate con dolcificanti artificiali) e carne in scatola. I pasti del secondo gruppo erano a base di roast beef, riso bollito, couscous e pasta, e prime colazioni a base di frutta secca, omelette di verdure cotte in olio, frittelle di patate cotte al burro e yogurt intero.

Roast beef, pasta e uova fritte fanno gola a molti, e nessuno si sarebbe stupito se le persone avessero mangiato più di queste rispetto alla carne in scatola. E invece no. I risultati di Hall, pubblicati all'inizio dell'anno su «Cell Metabolism», hanno dimostrato che le persone che seguivano la dieta ultraelaborata mangiavano circa 500 calorie in più al giorno rispetto a quando seguivano la dieta

I cibi industriali prevedono l'aggiunta di alcune sostanze, tra cui zucchero, grassi e sale, agli alimenti naturali, con l'obiettivo di migliorarne la conservazione o renderne più intenso il sapore. Questa categoria comprende le verdure e il pesce in scatola, le carni salate e gli insaccati, i formaggi e le bevande fermentate come vino e birra.

non trattata, un aumento che provocava in loro un aumento di 900 grammi in due settimane. «L'aspetto straordinario dello studio di Hall è la quantità di calorie extra che le persone mangiano di fronte a cibi ultraprocessati», afferma Carlos Augusto Monteiro, medico e professore di nutrizione e salute pubblica alla Scuola di sanità pubblica dell'Università di São Paulo, in Brasile.

Segnali interrotti

Perché le persone sono più tentate di eccedere consumando sostituti delle uova e pancetta di tacchino rispetto a uova vere e frittelle di patate fritte nel burro? Dana Small, neuroscienziata e docente di psichiatria alla Yale University, ritiene di aver scovato qualche indizio. Small studia l'impatto del moderno ambiente alimentare sui circuiti cerebrali. Le cellule nervose nell'intestino inviano segnali al cervello tramite un largo condotto chiamato nervo vago, spiega. Questi segnali comprendono informazioni sull'apporto di energia (calorie) che arriva nello stomaco e nell'intestino. Se le informazioni non sono chiare, i segnali confusi possono spingerci a mangiare troppo. Quando «il cervello non riceve il giusto segnale metabolico dall'intestino», dice Small, «non sa nemmeno se nell'intestino c'è del cibo oppure no».

Alcuni studi di *imaging* del cervello umano condotti da Small e altri indicano che gli stimoli sensoriali (odori, colori e consistenza) che accompagnano i cibi ad alta densità calorica attivano il corpo striato, una parte del cervello coinvolta nelle decisioni, comprese quelle sul consumo alimentare.

È qui che gli alimenti ultraprocessati diventano un problema, secondo Small. L'energia usata dal corpo dopo aver mangiato questi cibi non corrisponde alla percezione dell'energia ingerita. Di conseguenza il cervello entra in confusione e ci spinge a mangiare troppo. Per esempio i dolcificanti naturali (come il miele, lo sciroppo d'acero e lo zucchero da tavola) forniscono un certo numero di calorie, e l'anticipazione del sapore dolce suscitata da questi alimenti avvisa il corpo di prepararsi a quel determinato importo

calorico. Invece i dolcificanti artificiali anticipano l'esperienza del sapore dolce senza però dare energia. Il cervello, che prevedeva di ricevere un determinato apporto calorico e percepisce che manca qualcosa, ci spinge a mangiare di più.

A complicare ulteriormente le cose è il fatto che spesso i cibi ultraprocessati contengono una combinazione di dolcificanti nutrienti e non che, secondo Small, produrrebbe un effetto di rinforzo particolarmente potente a livello metabolico. In altre parole, mangiare questi alimenti ci fa desiderare di mangiarne ancora. «Ciò che emerge chiaramente è che il valore energetico di cibi e bevande che contengono sia dolcificanti nutrienti sia non nutrienti non viene trasmesso correttamente al cervello», osserva Small. «Inoltre, è chiaro che Hall ha dimostrato che le persone mangiano di più quando ricevono cibi altamente processati. La mia interpretazione è che quando mangiamo cibi ultraprocessati non riceviamo il segnale metabolico che riceveremmo da cibi meno lavorati, e che il cervello semplicemente non registra l'apporto calorico totale e continua quindi a richiedere altro cibo».

Secondo Small, gli studi sugli animali confermano che i cibi ultraprocessati alternano i segnali tra intestino e cervello che influiscono complessivamente sul rinforzo alimentare e l'assunzione di cibo. «Abbiamo affrontato il problema con noncuranza, pensando che "una caloria è sempre una caloria", ma la realtà è che molti cibi hanno conseguenze non previste», sostiene Small. «Per esempio nel mondo naturale i carboidrati si accompagnano quasi sempre alle fibre, mentre nei cibi ultraprocessati la fibra è completamente assente o presente in una forma che non c'è in natura. E in natura è difficile trovare nello stesso cibo carboidrati e grassi, mentre gli alimenti ultraprocessati tendono ad avere entrambi. Abbiamo creato tutti questi cibi incredibilmente golosi, pieni di grassi, zuccheri, sale e additivi, ed è normale che li preferiamo ad altri alimenti. Ma questi cibi tendono a non dare sazietà; al contrario, ci fanno venire voglia di mangiarne ancora».

Small e altri scienziati ipotizzano che i cibi ultraprocessati ricordino in parte l'effetto assuefacente delle droghe, dato che il loro consumo non ci fa sentire appagati ma provoca l'effetto opposto. Ann Graybiel, neuroscienziata del Massachusetts Institute of Technology, rinomata esperta sulla formazione delle abitudini, afferma che gli stimoli esterni, come la semplice visione di una barretta dolce, possono provocare un riflesso che porta il cervello a comportarsi in maniera quasi automatica. «Parte di ciò che avviene quando si creano le abitudini è una "suddivisione": impariamo lo schema comportamentale e il cervello incorpora l'intera sequenza, compresi i segnali di avvio e di fine, in modo da non doverci pensare più», afferma la neuroscienziata (alcuni neuroni nel corpo striato sono responsabili del raggruppamento dei comportamenti in un'unica routine).

Mangiare grandi quantità di cibi ultraprocessati potrebbe addirittura modificare i circuiti cerebrali in modo da aumentare la sensibilità agli stimoli sensoriali. Lo sostiene Kent Berridge, docente di psicologia e neuroscienze all'Università del Michigan, che ha osservato lo stesso effetto sui roditori. «Somministrando ai ratti una dieta a base di cibo spazzatura, alcuni aumentano di peso, altri no. Nei ratti obesi cambiava il sistema di regolazione della dopammina, rendendoli ipersensibili agli stimoli sensoriali; in altre parole, i ratti si sono concentrati solo su quella ricompensa. Non sembravano più appagati ma più desiderosi, e quel desiderio li spingeva ad attuare un maggior numero di comportamenti per procurarsi il cibo». Tuttavia, Berridge osserva che non è una reazione uniforme, e non pensa che sia l'unica ragione del consumo eccessivo di cibo. «È molto probabile che le alterazioni subite dai cibi ultraprocessati possano scatenare questa reazione in alcuni di noi, ma penso che presto scopriremo che non tutti siamo coinvolti da questo processo allo stesso modo. A mio avviso, in caso di obesità scopriremo l'esistenza di alcuni sottogruppi, ovvero che il percorso verso l'obesità dipende dal patrimonio genetico di ognuno».

Guerre alimentari

Non tutti i ricercatori concordano sul fatto che i cibi ultraprocessati conducano all'obesità. Rick Mattes, professore di scienze dell'alimentazione alla Purdue University e futuro direttore dell'American Society of Nutrition, dice di temere che Hall stia mettendo alla berlina un'intera categoria di alimenti senza ragione. «Hall afferma che i cibi ultraprocessati ci portano a mangiare troppo, ma non esistono prove sufficienti che lo dimostrino. A mio avviso, il modo in cui i cibi vengono trattati potrebbe non essere l'elemento che guida la nostra reazione nei loro confronti, mentre il fattore più importante è la composizione dei nutrienti».

Hall sottolinea di aver usato la stessa composizione nutrizionale in entrambe le diete, ma Mattes ha varie altre obiezioni. Forse la più seria è che ai partecipanti siano stati offerti soltanto cibi ultraprocessati o non lavorati nelle singole tranche dello studio. «Nel mondo reale, le persone mescolano i vari cibi», ha scritto Mattes in un'email. «Non si tratta di una lacuna dello studio, ma è una questione importante quando si cerca di estrapolare i risultati e applicarli a persone che vivono nella vita reale».

Un altro possibile fattore del consumo eccessivo di cibi ultraprocessati è la velocità con cui si consumano, che fa sì che le persone ne mangino in abbondanza prima che i meccanismi della sazietà entrino in gioco. I cibi ultraprocessati tendono a essere ricchi dal punto di vista energetico e a includere molte di calorie in porzioni relativamente piccole. Anche questo potrebbe causare un consumo troppo rapido, che va oltre i meccanismi della sazietà. Tuttavia, il fatto di mangiare velocemente non spiega perché le persone continuavano a mangiare più cibi ultraprocessati al pasto successivo, quando, almeno in teoria, avrebbero dovuto essere meno affamate.

Mangiare grandi quantità di cibi ultraprocessati potrebbe addirittura modificare i circuiti cerebrali, aumentando la sensibilità agli stimoli sensoriali

Se i cibi ultraprocessati sono un problema molto serio, la domanda è se si possa (e si debba) fare qualcosa per risolverlo, e cosa. Quando ho posto la domanda a Hall, ha preferito non esprimersi a favore di misure restrittive, come un'imposta su quei cibi. «Mi preoccupa il fatto che, poiché il 60 per cento delle calorie che assumiamo proviene da questi alimenti, tassarli aumenterebbe le difficoltà di alcune persone nel procurarsi da mangiare», ha affermato. «Abbiamo osservato una correlazione tra i cibi ultraprocessati e l'assunzione eccessiva di cibo, e ci sono diverse ipotesi sulle cause. Ma finché non comprendiamo pienamente i meccanismi sarà troppo presto per intervenire. Potrebbe darsi che abbiano un ruolo gli additivi e i condimenti artificiali, o che i cibi ultraprocessati siano carenti di micronutrienti che il corpo percepisce e a cui

I cibi non lavorati corrispondono alle parti commestibili delle piante (come i semi, le radici o le foglie) e degli animali (carne e uova). Questi prodotti possono essere congelati, essiccati o pastorizzati per allungarne la durata e non contengono sali, zuccheri, oli e grassi aggiunti.

risponde mangiando di più. È probabile che vi siano altri fattori, ma al momento non lo sappiamo».

Al tempo stesso, Hall è convinto che le prove disponibili sui cibi ultraprocessati siano motivo sufficiente per preoccuparsene. «Possiamo cambiare il nostro modo di mangiare per limitarne i danni. Per ora, credo che il nostro obiettivo debba essere questo». Il settore alimentare può senz'altro aiutare, magari progettando un maggior numero di cibi meno elaborati, ma le persone devono dimostrare di volere più cibi di questo tipo acquistandoli. «Non spetta a me convincere la gente», dice Hall, «ma sono convinto che le richieste delle persone al settore alimentare siano più potenti di qualsiasi norma». Il suo ruolo, in tutto questo, è occuparsi dell'aspetto scientifico. ■

PER APPROFONDIRE

Calorie for Calorie, Dietary Fat Restriction Results in More Body Fat Loss Than Carbohydrate Restriction in People with Obesity. Hall K.D. e altri, «Cell Metabolism», Vol. 22, n. 3, pp. 427-436, 1° settembre 2015.

Energy Expenditure and Body Composition Changes after an Isocaloric Ketogenic Diet in Overweight and Obese Men. Hall K.D. e altri, in «American Journal of Clinical Nutrition», Vol. 104, n. 2, pp. 324-333, agosto 2016.

Processed Foods and Food Reward. Small D.M. e DiFeliceantonio A.G., in «Science», Vol. 363, pp. 346-347, 25 gennaio 2019.

Ultra-Processed Diets Cause Excess Calorie Intake and Weight Gain: An Inpatient Randomized Controlled Trial of Ad Libitum Food Intake. Hall K.D. e altri, in «Cell Metabolism», Vol. 30, n. 1, pp. 67-77 ed e1-e3, 2 luglio 2019.

Quando il cibo è una droga. Kenny P.J., in «Le Scienze» n. 543, ottobre 2013.

1

2

4

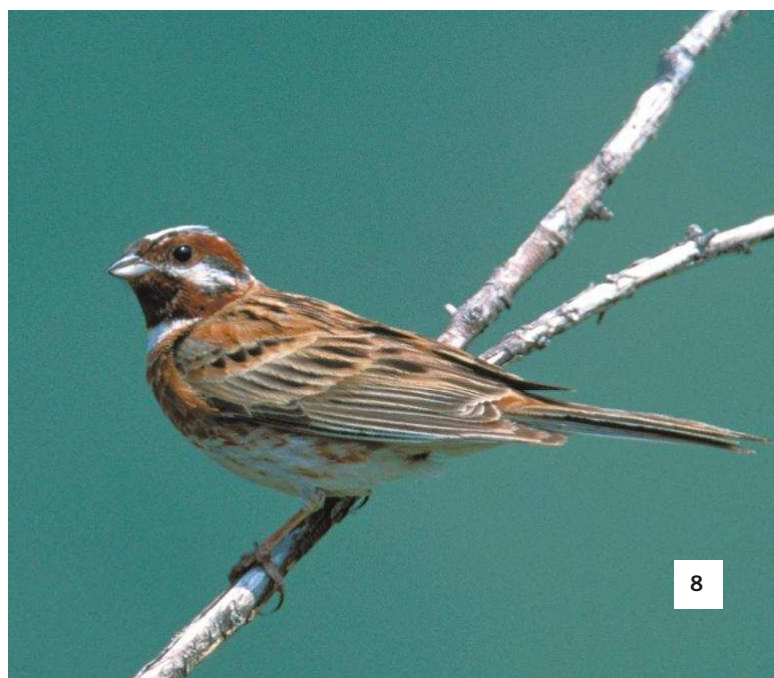
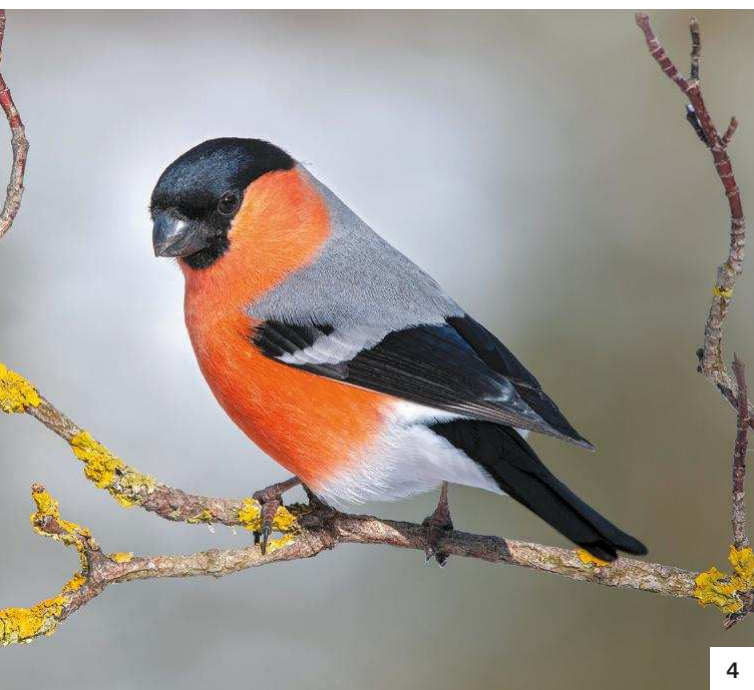
5

7

8

3

6

9

EVOLUZIONE

Canzoni alate

Gli uccelli canori hanno un cromosoma in più che potrebbe spiegarne la stupefacente diversità

di Kate Wong

Quando un massiccio pezzo di roccia infuocata largo 10 chilometri precipitò dallo spazio schiantandosi su quello che oggi è il Golfo del Messico, 66 milioni di anni fa, la distruzione che si scatenò per ogni dove cancellò più del 75 per cento della vita sulla Terra. L'asteroide di Chicxulub, così lo si chiama, è noto soprattutto per lo sterminio dei dinosauri. Ma se da un lato spazzò via *Tyrannosaurus rex* e *Triceratops*, sauropodi e adrosauri, dall'altro l'asteroide lanciò una delle linee di discendenza dei dinosauri sulla via che conduce alla gloria: quella degli attuali uccelli.

I primi inizi degli uccelli risalgono a oltre 150 milioni di anni fa; si sono evoluti a partire dai teropodi, dinosauri carnivori, e si erano già notevolmente diversificati nei primi 85 milioni di anni circa della loro esistenza. Ma gli antenati di quelli odierni – la linea di discendenza dei neorniti – erano giusto delle comparse rispetto ad arcaici uccelli come gli enantiorniti, i veri protagonisti. Quando l'asteroide colpì la Terra, però, la fortuna cambiò. L'impatto portò all'estinzione tutti i dinosauri non aviari e la maggior parte degli uccelli; solo i neorniti riuscirono ad attraversare quell'evento apocalittico. Un pugno di sopravvissuti che avrebbe poi dato origine a una delle massime radiazioni evolutive di tutti i tempi.

Oggi esistono più di 10.000 specie di uccelli, il che ne fa la seconda classe dei vertebrati viventi per numero di specie, su-

Tra le specie di uccelli canori in cui è stato trovato il cromosoma in più ci sono il diamante di Gould (1), la cannaiola di Blyth (2), l'allodola (3), il ciuffolotto comune (4), il corvo comune (5), il lucherino (6), il canarino (7), lo zigolo golarossa (8) e la rondine comune (9).

perata soltanto da quella dei pesci ossei. Ne esistono di tutte le forme e dimensioni – lo struzzo, che non vola, supera i 136 chilogrammi; il ronzante colibrì pesa meno di 2 grammi. Hanno colonizzato praticamente tutte le principali terre emerse e gli specchi d'acqua del pianeta, dai tropici ardenti ai gelidi poli. E si sono diversificati occupando un gran numero di nicchie alimentari, dotandosi nell'evoluzione di adattamenti utili a mangiare di tutto, dalle alghe microscopiche ai grossi mammiferi.

Incredibilmente, si tratta, per circa la metà delle specie, di uccelli canori, caratterizzati da un particolare apparato fonatorio. Del gruppo fanno parte passeracei, canarini, allodole e altri melodiosi cantori, ma anche uccelli dalla voce stridula (almeno per l'orecchio umano) come i corvi e loro parenti. Per dare un termine di paragone, ci sono altrettante specie viventi di uccelli canori che di mammiferi.

Come ha fatto questo particolare gruppo a diversificarsi tanto? Da tempo i biologi cercano qualche indizio per rispondere a questa domanda passando al setaccio la documentazione fossile e le sequenze del DNA degli uccelli moderni. A parte l'individuazione del luogo d'origine degli uccelli canori (l'Australia), molti di questi studi hanno dato risultati poco conclusivi o contrastanti. Un quadro dettagliato di dove e quando si sono separate le linee di discendenza che hanno condotto agli attuali uccelli canori – e quindi i fattori che ne hanno sospinto la radiazione evolutiva – è rimasto elusivo.

In assenza di prove conclusive che mostrino come sono andate le cose, i ricercatori hanno avanzato diverse teorie sulla diversificazione degli uccelli canori, variamente centrate su cambiamenti climatici, tettonica a zolle e selezione sessuale (quella in cui a sospingere l'evoluzione sono le preferenze d'accoppiamento).

Ma adesso, grazie a una nuova scoperta, la canzone sta cambiando. Tutti gli uccelli canori, a quanto pare, hanno un cromosoma in più che non sembra esistere negli altri uccelli. Questo suggerisce un meccanismo genetico che può creare barriere riproduttive tra le diverse popolazioni di una stessa specie, il che promuove la speciazione. C'è ancora molto da scoprire su questo pacchetto ausiliario di DNA, ma qualche ricercatore si sta già chiedendo se non possa essere proprio questo il segreto dello stupendo successo evolutivo degli uccelli canori.

I geni in tasca

Si tratta di un cromosoma ristretto alla linea germinale (GRC), nel senso che è presente nelle cellule riproduttive – uova, spermatozoi e loro precursori – ma non nel resto delle cellule del corpo, le cellule somatiche. I precursori delle uova e degli spermatozoi contengono il cromosoma GRC, che però viene eliminato durante il processo di maturazione degli spermatozoi, ed è dunque trasmesso alla progenie esclusivamente per via materna.

Fino a poco tempo fa il cromosoma GRC era noto solo in due fringuelli strettamente imparentati, il diamantino e il passero del Giappone, e sembrava nulla più che una bizzarria di queste due specie. Quando però i ricercatori hanno deciso di cercarlo in altre linee di discendenza degli uccelli è emersa una distribuzione molto notevole. In un lavoro pubblicato l'11 giugno sui «Proceedings of the National Academy of Sciences», Anna Torgasheva e Pavel Borodin, dell'Accademia russa delle scienze, Denis Larkin, dell'Università di Londra, e i loro collaboratori, riferiscono che tutte e 16 le specie di uccelli canori che hanno esaminato – un campione che comprende rappresentanti un po' di tutte le diramazioni del gruppo – avevano il cromosoma GRC, mentre nessuna delle otto specie che rappresentavano altri grandi gruppi di uccelli ne era dotato. Per di più, i cromosomi GRC che hanno trovato differiscono considerevolmente da una specie all'altra – anche tra specie strettamente imparentate – suggerendo che in queste linee di discendenza abbiano avuto una rapida evoluzione, visto che i cromosomi sono comparsi per la prima volta in un antenato comune vissuto, si stima, 35 milioni di anni fa.

Erano già stati trovati cromosomi extra in cellule di altri organismi: sono detti cromosomi B. Però la loro presenza è erratica, varia tra un membro e l'altro della stessa specie e persino tra le diverse cellule dello stesso individuo. Il cromosoma GRC, invece, «è un elemento obbligato della linea germinale degli uccelli canori», dice Larkin. Questa ubiquità suggerisce che sia più importante dei cromosomi B.

Importante per cosa, però, è ampiamente un mistero: si sa poco di ciò che fanno in realtà i suoi geni. Qualche indizio, tuttavia, è venuto alla luce. In un altro recente studio sul cromosoma GRC, pubblicato in anteprima sul server preprint bioRxiv ma non ancora uscito su una rivista scientifica soggetta a *peer review*, Cormac M. Kinsella e Alexander Suh, dell'Università di Uppsala, in Svezia, con i loro colleghi, hanno trovato che il cromosoma GRC del diamantino contiene almeno 115 geni, fra i quali alcuni che, a quanto si è visto, causano la sintesi di proteine e RNA nelle ovaie e nei testicoli degli uccelli adulti. Questo schema di espressione suggerisce che questi geni possano contribuire a guidare lo sviluppo di spermatozoi e uova. Altri geni del cromosoma GRC del diamantino sono paragonabili a geni che, dagli studi sui topi, risultano coinvolti nello sviluppo embrionale precoce.

Per Borodin e Larkin, questi risultati suggeriscono che i cromosomi GRC potrebbero aver permesso agli uccelli canori di aggirare vincoli decisivi nell'evoluzione degli uccelli. «Il genoma aviario è in genere molto compatto e conservato in confronto, per esempio, a quello dei mammiferi», spiega Larkin. I genomi degli attuali mammiferi pesano da meno di 2 a più di 8 picogrammi, con un

Kate Wong, *senior editor* di «Scientific American», si occupa di evoluzione ed ecologia.

IN BREVE

Poiché costituiscono una metà circa delle oltre 10.000 specie aviarie oggi viventi, gli uccelli canori sono il gruppo più ricco di specie degli uccelli.

I biologi si chiedono da tempo come mai gli uccelli canori si sono diversificati tanto. Le spiegazioni tradizionali sono centrate su fattori come i cambiamenti climatici.

Da recenti studi è però emerso che gli uccelli canori presentano un cromosoma extra, assente negli altri uccelli, che potrebbe essere stato la chiave della loro diversificazione.

numero di cromosomi che può variare da 6 a 102. Nelle decine di migliaia di anni in cui questi animali si sono evoluti, i loro cromosomi sono stati tagliati, spezzettati, riarrangiati e riattaccati molte volte, e i riarrangiamenti hanno alterato l'espressione dei geni, dando luogo a tratti diversi. Gli uccelli, di contro, hanno genomi che pesano da qualcosa di meno di 1 picogrammo fino a poco di più di 2. E di solito hanno circa 80 cromosomi, e relativamente poco DNA «spazzatura», come viene impropriamente chiamato, rispetto alla maggior parte dei mammiferi.

Il motivo per cui i genomi degli uccelli sono piccoli e ridotti al minimo, pensano alcuni esperti, ha a che fare con il volo. Volare è un'attività costosa dal punto di vista energetico. Un genoma più voluminoso richiede cellule più grandi, e tutti e due costano di più, metabolicamente, di quelli piccoli. Le forti esigenze metaboliche del volo potrebbero quindi aver posto un limite alle dimensioni dei genomi degli uccelli. Dato che il cromosoma GRC si trova solo nelle cellule della linea germinale e non in quelle somatiche, assai più numerose, potrebbe aver dato agli uccelli canori un raro blocco di DNA in più – utile all'evoluzione di nuovi tratti – senza i costi metabolici associati a un genoma somatico più grosso.

«Gli uccelli hanno bisogno di copie addizionali di geni specifici della linea germinale solo nei periodi riproduttivi, assai brevi, per produrre grandi quantità di sperma e riempire [gli oociti] di grandi quantità di proteine. Non hanno motivo di portarsi appresso questi geni per tutto l'anno e nel [resto del]le cellule, quando e dove non servono a niente», dice Borodin. Se gli uccelli canori avessero trovato negli stadi iniziali dello sviluppo un modo di procurarsi temporaneamente dei geni in più capaci di funzionare mantenendo intatto il proprio genoma di base, aggiunge Larkin, la cosa sarebbe stata estremamente vantaggiosa e potrebbe aver portato all'enorme varietà che vediamo negli uccelli canori rispetto agli altri gruppi.

Il cromosoma GRC potrebbe aver dato agli uccelli canori un raro blocco di DNA in più, utile all'evoluzione di nuovi tratti

In teoria, il cromosoma GRC potrebbe aver portato all'isolamento riproduttivo necessario per l'evoluzione di nuove specie, rendendo gli individui portatori del cromosoma extra incapaci di incrociarsi e di produrre progenie fertile con quelli che non lo avevano. Una volta originatosi il cromosoma GRC nell'ultimo antenato comune degli uccelli canori, i membri della specie ancestrale che ne erano dotati potevano produrre prole fertile solo con partner che fossero anch'essi portatori del cromosoma GRC. E a mano a mano che questo cromosoma si è evoluto e ha acquisito nuovi geni, gli uccelli canori con una determinata variante del cromosoma GRC hanno potuto produrre prole fertile solo con partner dotati della medesima variante.

Un motore di cambiamento?

Secondo Borodin e Larkin, la scoperta che i cromosomi GRC sono ampiamente diffusi tra gli uccelli canori e assenti in altri uccelli combacia bene con i risultati di un altro studio recente. Lo scorso aprile Carl Oliveros, della Louisiana State University, e colleghi, hanno riferito i risultati delle loro analisi del DNA di decine di specie dell'ordine dei passeriformi, che contiene gli uccelli canori e altri gruppi assai meno ricchi di specie. Sulla base delle sequenze di DNA e di una manciata di fossili di età nota, il gruppo ha ricostruito i legami tra le varie famiglie dei passeriformi e i tempi delle relative diramazioni evolutive. Ha poi messo a confronto la cronologia di questa diversificazione con la documentazione climatologica e geologica per vedere se gli andamenti della diversificazione dei passeriformi fossero correlati con gli eventi della storia del nostro pianeta, come prevedevano alcune delle ipotesi correnti. Nel complesso, le fluttuazioni del tasso di diversificazione di questi uccelli non seguono i cambiamenti della temperatura globale o la dispersione degli uccelli in nuovi continenti.

I risultati hanno spinto gli autori a proporre che le principali forze motrici della speciazione dei passeriformi siano stati meccanismi più complessi della semplice temperatura o delle opportunità ecologiche. «Queste conclusioni sono in linea con la nostra ipotesi che il cromosoma GRC abbia contribuito alla diversificazione degli uccelli canori», asserisce Larkin.

Non tutti però sono pronti ad accogliere l'idea che sia stato il cromosoma GRC a sospingere la diversificazione degli uccelli canori. «In generale, è difficile stabilire rapporti di causa ed effetto tra un dato tratto, come la presenza di cromosomi GRC, e il successo di un particolare gruppo nell'evoluzione», dice Oliveros. «La presenza di quel tratto può aver coinciso, per caso, con qualche altro carattere – per esempio il comportamento di nidificazione – che potrebbe aver avuto un ruolo più importante nel successo evolutivo di un gruppo».

Ma altri ricercatori, non coinvolti in questi nuovi studi, trovano l'idea interessante. «Il fatto che [i cromosomi GRC] si sono mantenuti per lunghi periodi evolutivi e in più contengono geni ritenuti funzionali [...] fa pensare che possano avere un ruolo nell'isolamento riproduttivo negli uccelli», osserva David Toews, della Pennsylvania State University. Se l'altissimo tasso di diversificazione degli uccelli canori rispetto a quello degli altri uccelli fosse davvero stato promosso da un meccanismo genomico come i cromosomi GRC, «sarebbe davvero entusiasmante: è una cosa che non avrei previsto», dice Toews. Che però avverte: «Dobbiamo saperne di più su ciò che fanno effettivamente, prima di poter stabilire con una certa sicurezza che c'è un rapporto».

Lo studio potrebbe avere implicazioni anche per la comprensione di altri organismi, al di là degli uccelli. «Pensavamo di sapere un bel po' di cose sull'organizzazione dei genomi degli uccelli – riflette Suh – ma il cromosoma GRC ce l'avevamo sotto gli occhi eppure era passato inosservato». Gli scienziati hanno trovato cromosomi extra in pesci simili alle lamprede e in alcuni insetti. Non potrebbero esserci cromosomi GRC, si chiede Suh, anche in altri rami dell'albero della vita? «Ciò che si è scoperto negli uccelli canori apre una serie di nuove direttrici di riflessione sull'evoluzione e sullo sviluppo». ■

PER APPROFONDIRE

Programmed DNA Elimination of Germline Development Genes in Songbirds. Kinsella C.M. e altri. Caricato sul server preprint Biorxiv il 22 dicembre 2018. **www.biorxiv.org/content/10.110¼44364v2**

Germline-Restricted Chromosome Is Widespread among Songbirds. Torgasheva A. e altri in «Proceedings of the National Academy of Sciences», Vol. 116, n. 24, pp. 11.845-11.850, 11 giugno 2019.

Spiegare il volo. Brusatte S., in «Le Scienze» n. 583, marzo 2017.

AGRICOLTURA

Ripristinare la biodiversità del riso

di Debal Deb

Varietà di questo alimento di base ormai dimenticate sono resistenti a inondazioni, siccità e altre calamità. La sfida è riportarle in vita

Le pannocchie, o panicoli, di diverse varietà di riso sono etichettate dopo il raccolto nell'azienda agricola Basudha, dedicata alla salvaguardia del riso tradizionale.

IN BREVE

L'India, in origine, aveva circa 110.000 varietà di riso (*landraces*) con proprietà diverse e preziose: per esempio erano ricche di sostanze nutritive fondamentali e capaci di resistere a inondazioni, siccità, salinità o infestazioni di parassiti.

La rivoluzione verde ha ricoperto i campi di poche varietà ad alto rendimento, portando alla scomparsa di circa il 90 per cento delle varietà dai raccolti agricoli.

Quelle ad alto rendimento richiedono investimenti costosi. Nelle aziende piccole o in condizioni ambientali avverse rendono malissimo, costringendo gli agricoltori più poveri a indebitarsi.

L'autore vuole raccogliere, rigenerare e documentare le caratteristiche delle varietà ancora in vita, condividendole con gli agricoltori e ripristinando parte della perduta biodiversità del riso.

Debal Deb ha fondato in India il centro Basudha per la conservazione del riso e la banca dei semi Vrihi a Kerandiguda, e ha fondato e presiede il Center for Interdisciplinary Studies a Barrackpur.

Un torrido giorno d'estate del 1991, dopo aver trascorso ore a osservare la biodiversità dei boschi sacri del Bengala Occidentale, in India, mi avvicinai alla capanna di Raghu Murmu per riposarmi. Raghu, un giovane della tribù Santal, mi fece sedere all'ombra di un gigantesco albero di mango, mentre sua figlia mi portava acqua fresca e dolci di riso. Mentre li stavo assaporando, notai che la moglie di Raghu, incinta, beveva un liquido rossastro. Raghu mi spiegò che si trattava dell'amido raccolto dalla cottura del riso Bhutmuri; letteralmente, il riso della «testa del fantasma», forse chiamato così a causa del suo involucro scuro (le glumelle). Raghu commentò che «restituisce il sangue che manca alle donne quando aspettano un bambino e dopo che è nato». Come appresi, si crede che questo amido curi l'anemia durante e dopo la gravidanza. Il mio ospite aggiunse che un'altra varietà di riso, il Paramai-sal (il «riso della longevità»), favorisce una crescita sana dei bambini.

Come avrei capito in seguito, il riso Bhutmuri è una delle tante varietà autoctone dell'Asia meridionale ricche di ferro e anche di certe vitamine B. Il riso Paramai-sal, invece, ha alti livelli di antiossidanti, di micronutrienti e di amido instabile che può essere trasformato rapidamente in energia. All'epoca, tuttavia, queste varietà di riso così poco comuni, con i loro nomi evocativi e gli usi descritti dalla medicina popolare, mi erano del tutto nuove. Quando tornai a casa a Calcutta (oggi Kolkata), feci una ricerca nella letteratura scientifica sulla diversità genetica del riso indiano e capii che ero stato fortunato a incontrare Raghu. I contadini come lui, che coltivano riso autoctono e ne apprezzano il valore, sono altrettanto minacciati di estinzione delle varietà che proteggono.

Negli anni seguenti ho familiarizzato con molte varietà di riso autoctone (*landraces*) che mostrano proprietà sorprendentemente utili e variegate. Alcune riescono a resistere a inondazioni, siccità, salinità o alle infezioni di parassiti; altre sono particolarmente ricche di vitamine o minerali preziosi; altre ancora hanno un colore, un gusto o un aroma attraenti, che hanno conferito loro ruoli speciali nelle cerimonie religiose. Raccogliere, rigenerare e condividere con gli agricoltori queste varietà incredibilmente rare e preziose è diventato lo scopo della mia vita.

Un tesoro perduto

Il riso coltivato in Asia (*Oryza sativa*) è il risultato di secoli di selezione e ibridazioni di specie selvatiche ancestrali – processo che Charles Darwin chiamava «selezione artificiale» – da parte degli uomini del Neolitico. Prove archeologiche e genetiche suggeriscono che la sottospecie *indica* del riso asiatico (quasi tutto il riso coltivato nel Subcontinente indiano appartiene a questo gruppo) fu coltivata per la prima volta tra circa 7000 e 9000 anni fa sulle colline ai piedi dell'Himalaya orientale. Nei successivi millenni di domesticazione e coltivazione, gli agricoltori crearono una miniera d'oro di varietà perfettamente adatte alle varie topografie e ai diversi terreni e microclimi, nonché appropriati per specifiche necessità culturali, nutrizionali o medicinali.

Secondo lo scienziato R.H. Richharia, uno dei precursori nelle ricerche sul riso, fino agli anni settanta nei campi indiani erano coltivate oltre 140.000 varietà autoctone diverse. Se escludiamo i sinonimi (casi in cui la stessa varietà, in luoghi diversi, è chiamata in modi diversi), questa cifra si riduce a circa 110.000 varietà distinte. Come ho imparato dalle mie ricerche nella letteratura scientifica, con l'avvento della rivoluzione verde la diversità genetica del riso indiano è diminuita considerevolmente.

Alla fine degli anni sessanta l'International Rice Research Institute (IRRI) offrì al governo indiano poche varietà di riso ad alto rendimento, che forniscono chicchi in grande quantità a fronte di una fornitura abbondante di acqua, fertilizzanti e pesticidi. In accordo con le agenzie per lo sviluppo internazionale, l'IRRI spinse affinché, in tutti i tipi di coltivazioni, le varietà autoctone fossero sostituite con questi ceppi importati. I nuovi tipi di riso, fortemente sostenuti e talvolta persino imposti agli agricoltori, si sostituirono rapidamente alle varietà autoctone.

Tra la fine degli anni sessanta e l'inizio degli anni ottanta, i ricercatori dell'IRRI stilarono un elenco di 5556 varietà autoctone presenti nel Bengala Occidentale, raccogliendone 3500 per la banca dei semi dell'istituto. Nel 1994, non trovando alcuna documentazione di varietà sopravvissute in questo Stato dell'India, cominciai la mia lunga indagine solitaria. Queste ricerche, conclusesi solo nel 2006, rivelarono che il 90 per cento delle varietà documentate era scomparso dai campi coltivati. È probabile, in realtà, che oggi in tutta l'India non esistano più di 6000 varietà autoctone diverse di riso. Analogamente, il Bangladesh Rice Research Institute ha documentato tra il 1979 e il 1981 i nomi di 12.479 varietà, ma la mia analisi di uno studio recente indica che nel paese non sono coltivate più di 720 varietà autoctone diverse.

Quando ebbi il sentore di questa spaventosa perdita di biodiversità nel Subcontinente indiano, ne fui scioccato sia come biologo sia come cittadino interessato. Mi chiesi perché le istituzio-

Fotgrafie di Zoë Savitz

Per riportare in vita varietà autoctone ormai dimenticate bisogna seminare, curare e raccogliere oltre 1000 varietà diverse all'anno. Queste foto di Basudha ritraggono una contadina che trapianta piante giovani in un campo allagato (*sopra*) e un altro contadino al lavoro nell'azienda agricola.

ni agricole non si stessero preoccupando dell'erosione genetica del cereale più importante della regione. Dopo la grande carestia delle patate in Irlanda del 1845-1849, le terribili conseguenze della perdita di diversità genetica in una coltura fondamentale avrebbero dovuto essere ormai evidenti.

La maggior parte delle patate coltivate in Irlanda era di una singola varietà, l'Irish Lumper; questa varietà era particolarmente vulnerabile a *Phytophthora infestans*, il microrganismo che provoca la peronospora delle patate. Nel 1846 tre quarti del raccolto erano andati perduti a causa dell'infezione; come risultato, negli anni seguenti la penuria di semi portò a effetti demografici dirompenti: quasi un milione e mezzo di persone morirono per fame e malattie nel corso della carestia, e in oltre dieci anni di fame e privazioni circa 1,3 milioni di irlandesi emigrarono in Nord America e Australia. Per gli agronomi, la lezione indimenticabile è che in assenza di varietà multiple una pianta può diventare vulnerabile alle fitopatie o alle infezioni parassitarie: nel lungo termine, le monocolture sono disastrose per la sicurezza alimentare. In seguito alla rivoluzione verde, insetti come *Dicladispa armigera* o *Nilaparvata lugens*, che prima di allora non avevano mai posto problemi, devastarono i raccolti di riso in molte nazioni asiatiche.

Ampie distese di monocolture sono un vero e proprio banchetto per certi parassiti. Gli agricoltori possono provare a eliminarli con applicazioni generose di pesticidi, finendo per uccidere i nemici naturali dei parassiti. L'effetto netto è che i parassiti si diversificano e si diffondono ancora di più, avviando un circolo vizioso che alimenta l'uso dei pesticidi. L'uniformità genetica delle specie coltivate – e in particolare le varietà della rivoluzione verde selezionate per una sola caratteristica, la resa elevata – implica anche che le piante sono prive delle proprietà che le rendono capaci di resistere ai capricci meteorologici: una pioggia insufficiente o tardiva, le inondazioni stagionali o le mareggiate che, dopo le tempeste tropicali, allagano con acqua di mare i campi coltivati lungo la costa. Una fragilità che rende i contadini più poveri – quelli che, per esempio, non hanno i soldi per comprare una pompa di irrigazione – più vulnerabili alle fluttuazioni ambientali.

La scomparsa di varietà autoctone implica una perdita ulteriore: quella del sistema di conoscenze associate alla coltivazione. Per esempio, i contadini distinguono le varietà osservando il periodo della fioritura, il colore della guaina fogliare della zona basale, l'angolo della foglia paniculare, la lunghezza della pannocchia, le dimensioni, il colore e la forma del chicco (*si veda il box a p. 70*). Grazie a queste e ad altre caratteristiche, gli agricoltori eliminano le piante atipiche o anomale, e mantengono la purezza genetica della varietà. Ma oggi la stragrande maggioranza dei contadini dell'Asia meridionale si affida a una fornitura di semi esterna, aggirando il bisogno di conservare la purezza dei semi coltivati a livello locale. Quando una varietà locale non è più disponibile, le conoscenze legate ai suoi usi agricoli e culturali scompaiono dalla memoria della comunità. Strategie millenarie per contrastare malattie e insetti infestanti sono state soppiantate dai consigli dei distributori di pesticidi, con conseguente peggioramento della qualità del terreno e dell'acqua, della biodiversità e della salute degli abitanti.

La rivoluzione verde e, più in generale, la modernizzazione dell'agricoltura, hanno avuto anche gravi effetti sociali ed economici. L'aumento dei costi di investimenti iniziali come semi, fertilizzanti, pesticidi e carburante per le pompe di irrigazione ha richiesto ai contadini di prendere denaro in prestito, spesso da privati. I debiti, insieme alla caduta dei prezzi del raccolto, hanno contribuito a spingere i contadini in difficoltà a vendere le loro piccole fattorie, oltre che a un'epidemia di suicidi tra gli agricoltori indiani. Per contro, dopo aver lavorato per decenni con contadini di tribù locali che nelle loro fattorie isolate coltivano ancora varietà autoctone di riso e miglio, non ho mai incontrato un singolo caso di suicidio legato al lavoro agricolo.

Nel 1996, dopo aver raccolto 152 varietà autoctone diverse, entrai in contatto con la Rice Research Station del Directorate of Agriculture dello Stato del Bengala Occidentale, dove dovrebbe essere conservato il germoplasma del riso (tutto il suo corredo genetico). Questo ente, però, non solo si rifiutò di accogliere e conservare i semi che avevo raccolto, ma il direttore mi rimproverò per il fatto di inseguire l'obiettivo «non scientifico e retrogrado» di riportare in vita le varietà dimenticate. Disse che insistendo nel coltivarle saremmo «ritornati all'età della pietra», condannando i

Una miniera d'oro di varietà di riso

I contadini tradizionali dell'Asia meridionale distinguono migliaia di varietà di riso esaminando con attenzione oltre 50 caratteristiche. Può trattarsi di proprietà temporali, per esempio il periodo di fioritura o quello necessario per la maturazione. Altrettanto importanti, tuttavia, sono quelle fisiche, come lunghezza, dimensione e colore della pannocchia che contiene i semi; angolo della foglia paniculare; lunghezza, colore e spessore del fusto; dimensione, forma e colore del chicco; il colore del nodo e così via. Queste competenze – oggi in pericolo di estinzione, come le stesse varietà – permettono agli agricoltori tradizionali di selezionare attentamente le varietà per usarle in nicchie ecologiche diverse, dai pendii delle zone secche ai bassopiani soggetti a inondazioni, o per specifici usi medici, alimentari o culturali.

Una varietà resistente alle inondazioni può tollerare un'immersione prolungata in acqua fino a due settimane, oppure allungare il fusto in accordo con l'innalzamento del livello dell'acqua, mantenendo all'asciutto la pannocchia. Queste proprietà sono governate da geni specifici, come *SUB1* (per l'immersione) o *SNORKEL1* e *SNORKEL2* (per l'allungamento del fusto).

I chicchi di riso possono differire nella lunghezza dell'arista; nel colore dell'involucro (glumelle); nella dimensione, nel colore e nell'aroma del seme e così via. Esistono rare varietà in cui un unico chicco contiene due o addirittura tre semi. Spesso gli agricoltori indigeni preferiscono varietà con un'arista lunga e affusolata, che costituisce un deterrente per gli animali al pascolo; alcune varietà aromatiche sono usate come prelibatezze durante le cerimonie.

Stadi dello sviluppo

I contadini distinguono le varietà anche da certe caratteristiche che compaiono solo in determinate fasi del ciclo vitale. Osservano il colore e la villosità della foglia sul finire della fase vegetativa; il momento preciso in cui si forma ed emerge la pannocchia, così come l'angolo formato dalla foglia paniculare, durante la fase riproduttiva; l'angolo della pannocchia, il colore dell'arista e le particolari caratteristiche del chicco a maturità raggiunta.

Illustrazione di Rebecca Konte

contadini a una bassa produttività e a una vita di stenti. Quando feci notare che nessuna varietà ad alto rendimento può sopravvivere in zone aride senza irrigazione, in campi inondati o in aree costiere ad alta salinità, il direttore mi assicurò che la moderna scienza transgenica avrebbe presto inventato le varietà migliori per queste fattorie nelle zone più marginali; dunque, avrei dovuto lasciare che se ne occupassero gli esperti in scienze agrarie.

Un'eredità vivente

Dopo aver studiato ecologia ed essermi specializzato in strutture e funzioni degli ecosistemi, ho iniziato a lavorare con l'ufficio regionale orientale del WWF-India. All'epoca, questa e altre organizzazioni per la conservazione cercavano di salvaguardare animali grandi e carismatici come la tigre; dato che i prodotti agricoli coltivati non sono parte della «natura selvaggia» , nessuno era concentrato sulla loro protezione. Anche gli istituti di ricerca non erano interessati, perché la conservazione di prodotti tradizionali non avrebbe ricevuto alcun finanziamento.

L'unica opzione che restava era di cavarmela da solo. Diedi le dimissioni nel 1996 e mi stabilii in un villaggio del Bengala Occidentale, dove istituii una banca dei semi tradizionali e un centro di scambio per gli agricoltori. Nei primi anni usai i miei risparmi e mi avvalsi del sostegno di Navdanya, un'organizzazione non governativa di New Delhi, per raccogliere semi rari da ogni angolo del paese e distribuirli gratuitamente ai contadini che ne avevano bisogno. Ma dal 2000 il grosso dei finanziamenti è costituito da donazioni di amici e sostenitori.

Le grandi banche di semi sono state create proprio grazie ai contributi dei contadini

Nel 1999, mentre mi trovavo nel Bengala settentrionale per un'indagine sulla biodiversità per conto del Dipartimento forestale dello Stato, colsi l'occasione per esplorare i campi della regione. Un giorno, dopo sei ore di viaggio in autobus e a piedi per raggiungere un remoto villaggio chiamato Lataguri, raccolsi una varietà di riso in grave pericolo di estinzione, Agni-sal. Per inciso, definisco in grave pericolo di estinzione una varietà coltivata in un'unica fattoria. Il chicco era di colore rosso acceso – da cui il nome *Agni*, che significa «fuoco» – e il fusto era abbastanza resistente da sopravvivere alle tempeste. La stagione successiva donai i semi a un contadino in cerca di riso che crescesse bene nella sua fattoria situata su un altopiano spazzato da forti venti. L'anno seguente, l'uomo tornò da me con un ampio sorriso di gratitudine: il raccolto di quel riso era stato ottimo, nonostante un ciclone avesse devastato tutte le fattorie vicine. L'anno dopo ancora, però, un funzionario del Dipartimento dell'agricoltura del distretto lo convinse a sostituire il riso Agni-sal con una varietà ad alto rendimento. Come risultato, il riso Agnisal andò perduto dalla nostra raccolta. Mi affrettai a tornare a Lataguri per procurarmi un altro campione dal contadino che mi aveva donato quel riso per la prima volta; ma appena arrivato, scoprii che l'uomo era morto l'anno prima, e che suo figlio aveva abbandonato quella varietà. Per quanto ne so, il riso Agni-sal si è estinto così.

Nello stesso periodo un altro incidente mi convinse che dovevo fare qualcosa di più che raccogliere e distribuire semi. Un tempo i contadini dei bassopiani indiani coltivavano due tipi di riso resistente alle inondazioni. Uno può diventare sempre più alto via via che aumentano i livelli dell'acqua; questa proprietà di allungare il fusto sott'acqua, governata dai geni *SNORKEL1* e *SNORKEL2* (sul cromosoma 12), si osserva in varietà come Lakshmi dighal, Jabrah, Pantara e Rani kajal. Un secondo tipo resistente alle inondazioni può sopportare un'immersione prolungata nell'acqua esondata. Uno dei geni che governano questa tolleranza all'acqua è *SUB1*, e si trova in molte varietà autoctone del Bengala.

Nel giugno 1999, un distretto meridionale del Bengala Occidentale fu colpito da un'inondazione improvvisa. Tutto il riso nei campi fu distrutto. All'epoca nella mia raccolta non c'erano varietà tolleranti alle inondazioni, ma sapevo che l'IRRI e il National Bureau of Plant Genetic Resources a New Delhi ne avevano a decine. Scrissi a entrambi gli enti, richiedendo che mi spedissero da 10 a 20 grammi di semi per salvare i contadini in difficoltà. Non ricevetti risposta da nessuna delle due banche dei semi. Se una persona istruita, che scrive una lettera su carta intestata in una lingua europea, non merita nessuna risposta da parte di banche dei semi indiane e internazionali, potete immaginare quali siano le probabilità che un povero contadino del Kenya o del Bangladesh riceva da loro campioni di semi. A quanto ne so nessun agricoltore, di nessuna nazione, ha mai ricevuto dei semi da queste prestigiose banche dei semi *ex situ*, nonostante le loro collezioni si siano costituite proprio grazie ai contributi dei contadini.

Per contro, le banche dei semi rendono le proprie raccolte accessibili alle aziende produttrici di sementi per programmi di ibridazione e brevetti. Una stima dell'International Food Policy Research Institute indica che, dal 1996, tre quarti dei campi di riso degli Stati Uniti sono stati seminati con materiali che derivano dalla raccolta dell'IRRI. Nel 1997, inoltre, lo U.S. Patent and Trademark Office ha concesso il brevetto più ampio di sempre per un riso tradizionale: si tratta di un ceppo ibrido di basmati, i cui «genitori» provenivano dall'Asia meridionale ed erano stati scelti dalla raccolta dell'IRRI dalla società texana RiceTec. L'IRRI stessa, che dovrebbe custodire la propria collezione per conto degli agricoltori di tutto il mondo, nel 2014 ha fatto domanda di brevetto internazionale per un gene del riso che accelera il rendimento, chiamato *SPIKE* e scoperto nella varietà autoctona indonesiana Daringan. Per inciso, l'organismo decisionale dell'International Treaty on Plant Genetic Resources for Food and Agricolture ha messo in discussione la legittimità di questa domanda controversa, ma non ha ancora deliberato.

Non solo le banche dei semi *ex situ* sono fisicamente e socialmente lontane dagli agricoltori: anche i loro semi sono danneggiati da un lungo isolamento. I semi del riso sono essiccati e conservati a −20 gradi Celsius, cosa che li rende utilizzabili per un periodo che va fino a 35 anni. Congelati nel tempo, sono separati dalle forme di vita in costante evoluzione del mondo esterno. Una volta seminati dopo 35 anni, avrebbero perso la resistenza a certi patogeni che, nel frattempo, si sono evoluti in ceppi nuovi. Per contro, le banche dei semi gestite dai contadini *in situ*, vicine ai campi, hanno un *budget* forzatamente ridotto, e ogni anno devono seminare tutta la collezione; in caso contrario, la maggior parte del riso non riuscirebbe più a germinare. Grazie a questo vincolo, i semi conservati dai contadini continuano a coevolvere con patogeni e parassiti.

Dopo una serie di esperienze e osservazioni di questo tipo, decisi di costruire un centro per la conservazione dei semi, così da mantenere una piccola popolazione di ciascuna varietà autoctona e far sopravvivere tutte le varietà di riso anche se fossero state abbandonate dalla maggior parte dei contadini. Nel 2001, grazie ai fondi risparmiati da una borsa postdottorale all'Università della

California a Berkeley, riuscii a fondare l'azienda agricola Basudha. Vrihi è oggi la banca del germoplasma per la conservazione del riso *open access* più grande dell'Asia meridionale e ogni anno le sue 1420 varietà sono seminate a Basudha, in un villaggio tribale nello Stato indiano dell'Orissa. Delle varietà contenute nella nostra collezione, 182 sono scomparse dai campi dell'India.

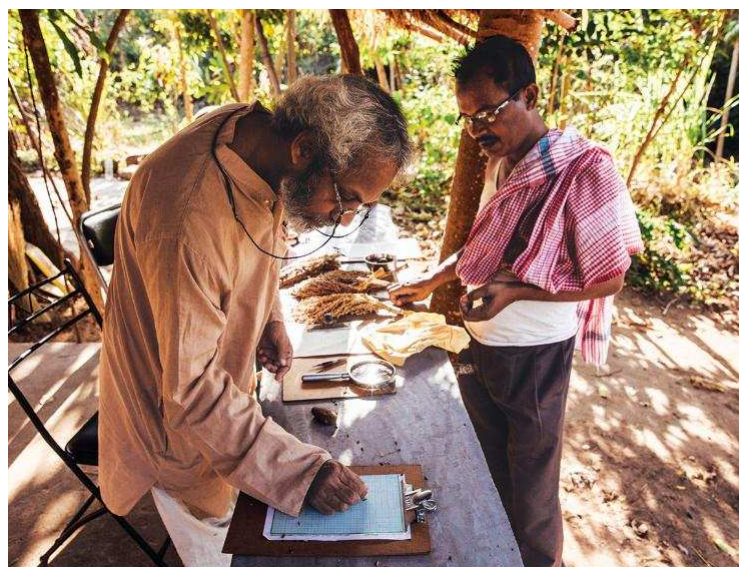
Con meno di 0,7 ettari a disposizione, dobbiamo far crescere 64 piante di ogni varietà su appena 4 metri quadrati di terreno. Per inciso, il numero minimo di piante necessario per mantenere tutte le caratteristiche genetiche di una data varietà è circa 50. Dal momento che, per ciascuna varietà, non possiamo rispettare la distanza raccomandata dagli organismi internazionali di almeno 110 metri su ciascun lato, impedire l'impollinazione incrociata tra varietà vicine è una vera sfida. Sono riuscito a vincerla piantando le diverse varietà in modo che ognuna sia circondata da varietà con diversi tempi di fioritura. Inoltre, a Basudha eliminiamo le piante atipiche di ogni popolazione nelle diverse fasi di crescita osservando 56 caratteristiche, seguendo le linee guida di Bioversity International. Dopo questo stadio, tutti i semi raccolti sono ritenuti geneticamente puri al 100 per cento, se si eccettuano mutazioni che non è stato possibile rilevare.

A Basudha, tutte le varietà autoctone di riso sono coltivate in accordo con il principio agroecologico di «zero input esterni»: nessuna sostanza agrochimica, nessuna estrazione di acqua di falda, nessun combustibile fossile. Le sostanze nutritive si ottengono usando un pacciame di foglie e paglia, impiegando come *cover crop* (coltura di copertura) leguminose (le cui radici sono ricche di microbi azotofissatori), adoperando compost vegetale, letame, biochar e microbi del suolo. Un'altra strategia consiste nel mantenere pozze d'acqua con funzione di habitat di riproduzione per rane e insetti acquatici, che si cibano anche degli infestanti del riso. Occasionalmente usiamo anche repellenti naturali come tabacco, aglio e basilico sacro (*Ocimum sanctum*). Le malattie del raccolto non sono mai un problema, a Basudha: la diversità di specie e di varietà è stata ripetutamente documentata come la strategia migliore per proteggere le piante dai patogeni.

Conserviamo alcuni semi raccolti in vasi di terracotta, che li proteggono da insetti e roditori pur permettendo loro di «respirare» per la semina dell'anno successivo. Il resto è distribuito tra i contadini in cambio di una manciata di semi di altre varietà tradizionali, che poi coltiviamo e regaliamo ai contadini. Questo sistema è un tentativo consapevole di far rivivere l'antica pratica dello scambio di semi diffusa nelle comunità agricole, che un tempo aiutò le varietà delle diverse colture a diffondersi tra i continenti.

Insieme ai miei collaboratori, ho creato oltre 20 banche dei semi in diverse parti dell'India, così che gli agricoltori locali possano accedere alle varietà di cui hanno bisogno senza dover andare fino a Vrihi. Sosteniamo anche reti di scambio di semi tra i contadini. Queste banche e queste reti hanno coinvolto oltre 7800 agricoltori in cinque Stati. Inoltre, documentiamo caratteristiche e proprietà di ogni varietà e registriamo le varietà autoctone a nome dei contadini, per impedire brevetti «pirata». In questo modo cerchiamo di ridare ai contadini il potere sui semi: è un potere essenziale per la loro sicurezza finanziaria e alimentare di lungo termine.

Una panoplia

Nelle fattorie sempre a rischio di siccità o di inondazioni stagionali, le varietà tradizionali sono l'unico mezzo affidabile per assicurare cibo ai contadini più poveri. Dopo aver coltivato varietà tradizionali di riso per 22 anni, mi fido del fatto che, in caso di siccità, varietà autoctone come Kelas, Rangi, Gadaba, Kaya e Velchi avranno un rendimento migliore di qualsiasi moderna varietà ad alta resa. Lakshmi dighal, Rani kajal e Jabra sono in grado di allungare il proprio fusto con l'innalzamento dell'acqua esondata, mantenendo all'asciutto le pannocchie (che contengono i semi) fino a 4 metri di profondità. Matla, Getu, Talmugur e Kallurundai possono crescere in terreni ad alta salinità e sopravvivere alle incursioni di acqua di mare. Queste varietà sono linee germinali stabili, con un pacchetto di geni che conferiscono loro un'ampia plasticità adattativa.

Inoltre, in fattorie alimentate con acqua pluviale e condizioni ottimali del suolo, un gran numero di varietà di riso tradizionali (per esempio Bahurupi, Bourani, Kerala sundari e Nagra) rende più delle moderne varietà ad alto rendimento. Un insieme di varietà rarissime, con una resa relativamente alta, include risi con seme doppio o triplo che possono essere il risultato di rare mutazioni nei geni strutturali del fiore della pianta. Sembra che Basudha sia l'ultimo depositario di uno di questi risi con tre semi, la varietà Sateen.

Molte varietà hanno anche una speciale resistenza a patogeni e insetti nocivi. Kalo nunia, Kalanamak, Kartik-sal e Tulsi manjari sono resistenti al brusone, Bishnubhog e Rani kajal a certe fitopatologie batteriche, mentre Kataribhog è moderatamente resistente al Tungro virus. Gour-Nitai, Jashua e Shatia sembrano resistere agli attacchi della falena infestante *Parapoynx stagnalis*, ed è raro osservare attacchi al fusto da parte di certe specie di *stemborer* nelle varietà Khudi khasa, Loha gorah, Malabati, Sada Dhepa e Sindur mukhi. I semi di questi risi distribuiti da Vrihi negli ultimi 25 anni, più o meno, hanno ridotto le perdite di raccolto dovute a insetti nocivi e a patologie varie in migliaia di campi coltivati.

Oggi la selezione artificiale del riso si concentra soprattutto sul potenziare la resa dei chicchi, ma molte varietà di riso tradizionali contengono vari micronutrienti assenti nelle cultivar moderne. I nostri studi più recenti hanno identificato almeno 80 varietà tradizionali contenenti più di 20 milligrammi di ferro per chilogrammo di riso; i livelli più alti registrati sono quelli delle varietà Harin kajli, Dudhé bolta e Jhuli, che vanno da 131 a 140 milligrammi per chilogrammo. Al confronto, il riso transgenico IR68144-2B-2-2-3, sviluppato dall'IRRI con costi enormi per arricchirlo in ferro, ne contiene 9,8 milligrammi per chilogrammo.

Debal Deb e il suo collaboratore di lungo corso Debdulal Bhattacharya esaminano, registrano (*pagina a fronte*) e discutono nel dettaglio (*sotto*) le caratteristiche dei chicchi di riso dopo il raccolto.

Certe varietà autoctone possono avere usi medicinali. L'Ayurveda, il sistema indiano di medicina tradizionale, consiglia di usare il riso Nyavara, dello Stato del Kerala, per curare una classe di disturbi neurologici. Insieme ai miei collaboratori ne sto esaminando la composizione chimica e spero di studiarne l'efficacia per questo scopo. Un altro riso medicinale, il Garib-sal, del Bengala Occidentale, era prescritto nella medicina tradizionale per curare le infezioni gastroenteriche. In un articolo pubblicato nel 2017 su «ACS Sustainable Chemistry and Engineering», ho documentato insieme ai miei colleghi la bioaccumulazione di argento nei chicchi di Garib-sal fino a 15 parti per milione. Secondo uno studio pubblicato nel 2017 su «Chemistry Letters», le nanoparticelle d'argento uccidono batteri patogeni: questo riso potrebbe allora aiutare a contrastare i patogeni presenti nel nostro intestino. Una pletora di altre varietà di riso medicinali aspetta di entrare in laboratorio e partecipare a test clinici.

Anche l'estetica è un valore apprezzato dai contadini, che coltivano certe varietà semplicemente per la bellezza dei loro colori o della loro struttura: solchi dorati, marroni, violetti e neri su glumelle gialle, apici viola, ariste nere e così via. In India orientale, molti vanno fieri della bellezza delle estensioni simili ad ali del lemma sterile dei risi Moynatundi e Ramigali. Le varietà aromatiche sono associate a cerimonie religiose e festival culturali in tutte le società che coltivano riso. Quando questi tipi di riso scompaiono dai campi, vengono meno molte prelibatezza culinarie, e le cerimonie a esse associate perdono il proprio significato simbolico e culturale. La collezione di 195 varietà aromatiche di Basudha ha aiutato a riportare in vita molte cerimonie tradizionali e tradizioni alimentari locali ormai evanescenti.

La complessità delle interazioni ecologiche è emersa in un altro gruppo di varietà di riso. I contadini proprietari di piccoli appezzamenti nel Bengala Occidentale e nel Jharkhand preferiscono varietà con un'arista lunga e resistente (l'arista è la punta in cima al rivestimento del chicco di riso), che dissuadono il bestiame e le capre dal cibarsi delle piante. Gli agricoltori preferiscono inoltre varietà con foglie paniculari erette, perché così gli uccelli che si cibano dei chicchi non possono usarle per appoggiarsi.

È interessante che in Orissa alcuni contadini coltivino sui propri terreni una combinazione di varietà con e senza arista in assenza di vantaggi evidenti. Altre varietà rare che non hanno un uso ovvio mostrano fusti e foglie viola. Sembra proprio che la tradizione dell'Asia meridionale ritenga la biodiversità – sia genetica, sia a livello di specie – così essenziale per l'agricoltura da incastonarla in certi rituali religiosi. Per esempio alcuni parenti selvatici del riso coltivato come Buno dhan (*Oryza rufipogon*) e Uri dhan (*Hygroryza asiatica*) sono associati a riti indù locali e continuano a essere mantenuti in molte fattorie del Bengala Occidentale e del suo Stato vicino, il Jharkhand. Questi pool genetici di specie selvatiche sono sempre più importanti come fonte di tratti genetici insoliti che possono essere incorporati, a richiesta, in cultivar esistenti. Inoltre, è stata considerata di buon auspicio la presenza nei campi di riso di alberi come il *neem* (*Azadirachta indica*), le cui foglie sono un pesticida naturale, e di predatori come il gufo.

Salvare i contadini

Dato il fallimento della ricerca agraria moderna nel fornire ai contadini più emarginati linee germinali affidabili, la nostra opzione migliore consiste in una grande raccolta di varietà di riso tradizionali, tutte così ben adattate a condizioni avverse. Convinti dalla maggior stabilità della produttività delle varietà autoctone, oltre 2000 contadini di Orissa, Andhra Pradesh, Bengala Occidentale, Karnataka, Kerala e Maharashtra hanno adottato molte varietà di riso tradizionali proposte da Vrihi, smettendo di coltivare quelle ad alto rendimento.

Quando, nel maggio 2009, il ciclone Aila colpì la parte costiera della foresta di mangrovie delle Sundarbans, estesa tra Bengala Occidentale e Bangladesh, uccise quasi 350 persone e oltre un milione perse la casa. L'inondazione che ne seguì sommerse i campi con acqua di mare, lasciandoli con un alto tasso di salinità. Di conseguenza, oltre all'immediata devastazione, a lungo termine la regione avrebbe anche sofferto di problemi legati alla sicurezza alimentare. Distribuimmo una piccola quantità di semi della collezione di Vrihi, scelti tra le varietà con buona tolleranza alla salinità (come Lal Getu, Nona bokra e Talmugur), tra alcuni agricoltori dei villaggi insulari delle Sundarbans. Nei campi ad alto tasso di salinità, furono le uniche varietà di riso che, in quella stagione disastrosa, ebbero un rendimento misurabile. Analogamente, nel 1999 molte varietà tradizionali come Jabra, Rani kajal e Lakshmi dighal, assicurarono una produzione di riso ai contadini del Bengala meridionale dopo l'inondazione improvvisa del fiume Hugli. Nel 2010 Bhutmuri, Kalo gorah, Kelas e Rangi salvarono molti agricoltori nel distretto occidentale di Puruliya quando un ritardo nell'arrivo dei monsoni causò una grave siccità.

Questi disastri naturali hanno dimostrato più e più volte che la sostenibilità a lungo termine della risicoltura dipende in modo cruciale dal ripristino delle pratiche agricole tradizionali, basate sulla biodiversità, e dallo sfruttamento di tutta la diversità contenuta nelle varietà di riso sopravvissute all'assalto dell'agricoltura industriale. ■

PER APPROFONDIRE

Beyond Developmentality: Constructing Inclusive Freedom and Sustainability. Deb D., Earthscan, 2009.

Rice: Origin, Antiquity and History. Sharma S.D. (*a cura*), CRC Press, 2010.

The Imperial Roots of Hunger. Mukerjee M., in «Himal Southasian», Vol. 26, n. 2, pp. 12-25, aprile 2013.

A Profile of Heavy Metals in Rice (*Oryza sativa* ssp. *indica*) Landraces. Deb D. e altri, in «Current Science», Vol. 109, n. 3, pp. 407-409, 10 agosto 2015.

Boschi sacri. Gadgil M., in «Le Scienze» n. 607, marzo 2019.

FISICA

Cristalli nel tempo

Nuovi sorprendenti stati della materia chiamati cristalli temporali mostrano nel tempo le stesse proprietà di simmetria che i normali cristalli presentano nello spazio

di Frank Wilczek

Illustrazione di Mark Ross Studio

Frank Wilczek è fisico teorico al Massachusetts Institute of Technology. Nel 2004 ha ricevuto il premio Nobel per la fisica per il suo lavoro sulla teoria dell'interazione forte e nel 2012 ha proposto il concetto dei cristalli temporali.

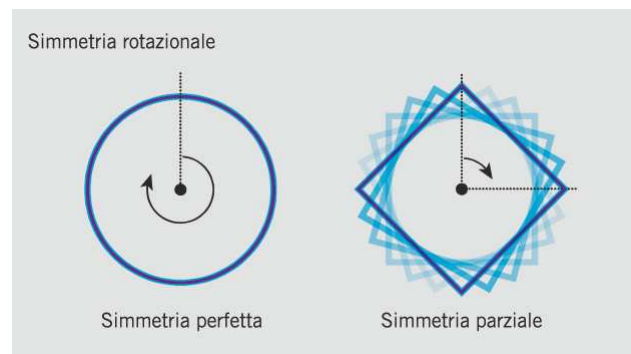
I cristalli sono la materia più ordinata della natura. Al loro interno atomi e molecole sono disposti in strutture regolari ripetute, dando origine a solidi stabili, rigidi e spesso belli da vedere. I cristalli hanno destato fascino e interesse (e spesso sono stati usati come gioielli) da ben prima delle origini della scienza moderna. Il lavoro effettuato nell'Ottocento per classificare le forme dei cristalli e comprenderne l'effetto sulla luce ha catalizzato importanti progressi in matematica e fisica.

Poi, nel Novecento, lo studio delle fondamentali proprietà quantomeccaniche degli elettroni nei cristalli ha portato direttamente alla moderna elettronica dei semiconduttori e infine agli *smartphone* e a Internet.

Il passo successivo nella comprensione dei cristalli sta avvenendo proprio ora, grazie a un principio emerso dalla teoria della relatività di Albert Einstein: spazio e tempo sono strettamente connessi e, in fin dei conti, si trovano sullo stesso piano. È quindi naturale chiedersi se ci siano oggetti che mostrano proprietà nel tempo analoghe alle proprietà dei normali cristalli nello spazio. Approfondendo questo problema abbiamo scoperto i «cristalli temporali». Questo nuovo concetto, insieme alla crescente classe di nuovi materiali che vi rientrano, ha portato a interessanti risultati teorici, ma ha anche un potenziale per nuove applicazioni, tra cui orologi più precisi di quelli che esistono oggi.

Simmetria

Prima di spiegare in modo compiuto questa nuova idea, devo chiarire che cos'è esattamente un cristallo. La risposta più proficua ai fini scientifici introduce due concetti profondi: la simmetria e la rottura spontanea della simmetria. Nell'uso comune la parola «simmetria» indica in modo molto generale equilibrio, armonia o addirittura giustizia. In fisica e in matematica, il significato è più preciso: diciamo che un oggetto è simmetrico o che ha certe simmetrie se esistono trasformazioni che potrebbero modificarlo ma in realtà lo lasciano immutato.

Questa definizione può sembrare inizialmente strana e astratta, e quindi concentriamoci su un esempio semplice: pensiamo a un cerchio. Quando ruotiamo un cerchio attorno al suo centro, di un angolo qualunque, visivamente rimane immutato, anche se tutti i suoi punti potrebbero essersi mossi; ha una simmetria rotazionale perfetta. Un quadrato ha una certa simmetria, ma meno di un cerchio, perché è necessario ruotare un quadrato di 90 gradi prima che riacquisti il suo aspetto iniziale. Questi esempi mostrano che il concetto matematico di simmetria cattura un aspetto essenziale del suo significato comune, con in più la virtù di essere preciso.

Una seconda virtù di questo concetto di simmetria è che si può generalizzare. Possiamo adattare l'idea in modo che non si applichi solo alle figure geometriche ma più in generale alle leggi fisiche. Diciamo che una legge presenta una simmetria se possiamo cambiare il contesto in cui viene applicata la legge senza cambiare la legge stessa. Per esempio, l'assioma di base della relatività ristretta è che valgono le stesse leggi fisiche quando osserviamo il mondo da sistemi di riferimento diversi che si muovono a velocità costanti l'uno rispetto all'altro. La relatività richiede quindi che le leggi fisiche presentino un certo tipo di simmetria, vale a dire le invarianze per cambiamenti del sistema di riferimento che i fisici chiamano *boost*.

IN BREVE

I cristalli sono stati ordinati della materia in cui la disposizione degli atomi ha una struttura ripetuta. Nel linguaggio della fisica, si dice che hanno «rotto spontaneamente la simmetria spaziale».

I cristalli temporali, un concetto recente, sono stati della materia i cui schemi si ripetono a intervalli fissi di tempo, anziché di spazio. Sono sistemi in cui è la simmetria temporale a rompersi spontaneamente.

Il concetto di cristallo temporale è stato proposto per la prima volta nel 2012; nel 2017 sono stati scoperti i primi nuovi materiali che rientrano pienamente in questa categoria. Quei materiali, e altri che sono seguiti, aprono alla possibilità di ottenere orologi più precisi che mai.

Illustrazioni di Jen Christiansen

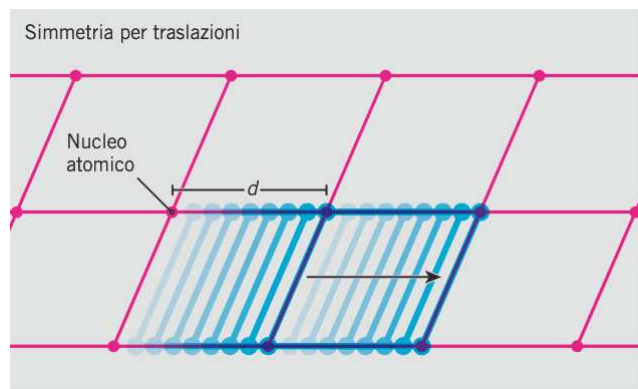
Per i cristalli, tra cui quelli temporali, è importante una diversa classe di trasformazioni, quelle di un tipo semplice ma importantissimo: le «traslazioni». Mentre la relatività dice che per osservatori in sistemi di riferimento in moto uno rispetto all'altro valgono le stesse leggi, la simmetria rispetto alle traslazioni spaziali afferma che le stesse leggi valgono per osservatori che si trovano in luoghi diversi. Se spostiamo, o «trasliamo», il nostro laboratorio da un luogo a un altro scopriremo che nella nuova posizione valgono le stesse leggi. La simmetria per traslazioni spaziali, in altre parole, afferma che le leggi che scopriamo in un punto qualsiasi si applicano in tutti i punti. La simmetria rispetto alle traslazioni temporali esprime un'idea simile, ma per il tempo anziché per lo spazio. Dice che le stesse leggi che valgono per noi adesso si applicano anche agli osservatori nel passato o nel futuro: in altre parole, le leggi che scopriamo in un qualsiasi momento si applicano in ogni momento. Considerando la sua importanza fondamentale, la simmetria rispetto alle traslazioni temporali si merita un nome che non sia così proibitivo. Qui la chiamerò semplicemente «tau», cioè la lettera greca τ.

Senza la simmetria rispetto alle traslazioni spaziali e temporali, gli esperimenti condotti in luoghi diversi e in momenti diversi non sarebbero riproducibili. Nel loro lavoro quotidiano gli scienziati danno per scontate queste simmetrie; ma se non esistessero la scienza come la conosciamo sarebbe impossibile. È però importante sottolineare che possiamo verificare empiricamente la simmetria per traslazioni spaziali e temporali, e in particolare possiamo osservare il comportamento di oggetti astronomici distanti. Sono situati, ovviamente, in luoghi diversi dal nostro e, grazie alla velocità finita della luce, possiamo osservare nel presente come si comportavano in passato. Gli astronomi hanno appurato, con grande dettaglio e precisione, che effettivamente valgono le stesse leggi.

Rottura della simmetria

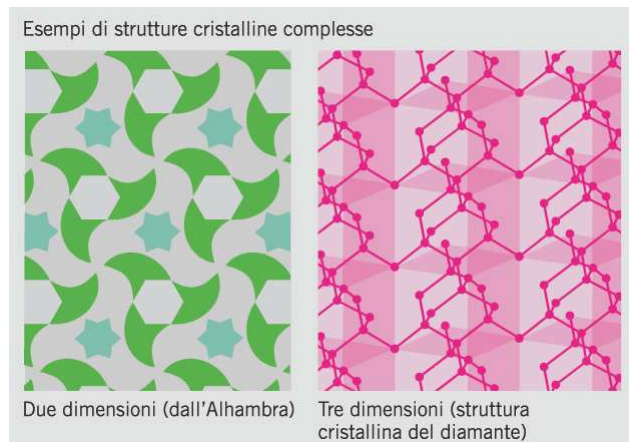
Malgrado la loro affascinante simmetria, in realtà per i fisici i cristalli sono definiti dal modo in cui sono privi di simmetria.

Immaginiamo un cristallo estremamente idealizzato. Sarà unidimensionale, e i nuclei dei suoi atomi si troveranno a intervalli regolari lungo una retta, separati da una distanza d. (Le loro coordinate quindi saranno nd, dove n è un numero intero.) Se trasliamo questo cristallo a destra di una minuscola distanza, avrà un aspetto diverso; solo dopo averlo traslato della specifica distanza d rivedremo lo stesso cristallo. Pertanto, il nostro cristallo idealizzato ha un livello limitato di simmetria rispetto alle traslazioni spaziali, allo stesso modo in cui un quadrato ha un livello limitato di simmetria rispetto alle rotazioni.

Simmetria per traslazioni

I fisici affermano che in un cristallo la simmetria per traslazioni delle leggi fondamentali è «rotta», il che conduce a una minore simmetria per traslazioni. La simmetria rimanente descrive l'essenza del nostro cristallo. Infatti, se sappiamo che la simmetria di un cristallo consiste nelle traslazioni di multipli della distanza d, allora sappiamo dove disporne gli atomi uno rispetto all'altro.

Le strutture cristalline in due e tre dimensioni possono essere più complicate, e ce ne sono molti tipi. Possono avere una simmetria parzialmente rotazionale e parzialmente traslazionale. Gli artisti del XIV secolo che decorarono l'Alhambra a Granada, in Spagna, scoprirono molte possibili forme di cristalli bidimensionali con l'intuito e la sperimentazione, e nell'Ottocento i matematici classificarono le possibili forme di cristalli tridimensionali.

Esempi di strutture cristalline complesse

Due dimensioni (dall'Alhambra) Tre dimensioni (struttura cristallina del diamante)

Nell'estate del 2011 mi stavo preparando per insegnare questo elegante capitolo della matematica in un corso sugli usi della simmetria in fisica. In genere cerco sempre di guardare con occhi nuovi il materiale che proporrò agli studenti e, se è possibile, di aggiungere qualcosa di inedito. Mi è venuto in mente allora che si poteva estendere la classificazione delle possibili strutture cristalline nello spazio tridimensionale a quelle nello spazio-tempo quadridimensionale.

Quando ho accennato questa possibile direzione di ricerca matematica ad Alfred Shapere, un mio ex studente che ora è uno stimato collega, attualmente all'Università del Kentucky, mi ha esortato a prendere in considerazione due questioni fisiche di base, che mi hanno lanciato in una sorprendente avventura scientifica:

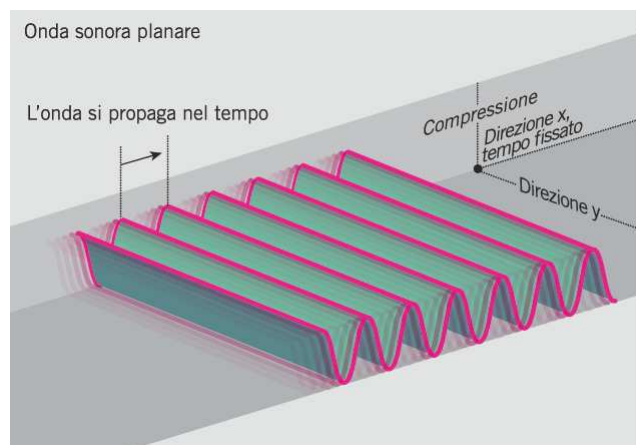
Quali sistemi del mondo reale possono essere descritti dai cristalli spazio-temporali?

Queste strutture possono portarci a identificare stati caratteristici della materia?

La risposta alla prima domanda è abbastanza semplice. Mentre i cristalli ordinari sono disposizioni ordinate di oggetti nello spazio, i cristalli spazio-temporali sono disposizioni ordinate di eventi nello spazio-tempo.

Come abbiamo fatto per i cristalli normali, possiamo orientarci considerando il caso unidimensionale; qui semplifichiamo i cristalli spazio-temporali e pensiamo a cristalli puramente temporali. Cerchiamo quindi sistemi il cui stato generale si ripeta a intervalli regolari. Sistemi di questo genere ci sono familiari in modo quasi imbarazzante: per esempio, la Terra ripete il suo orientamento nello spazio a intervalli quotidiani e il sistema Terra-Sole ripete una stessa configurazione a intervalli annuali. Nel corso della storia sono stati messi a punto sistemi che ripetono la

loro configurazione a intervalli sempre più precisi, per usarli come orologi. Gli orologi a pendolo e a molla sono stati sostituiti da orologi basati su cristalli (tradizionali) vibranti, che a loro volta sono stati sostituiti da orologi basati su atomi vibranti. Gli orologi atomici hanno raggiunto una precisione straordinaria, ma ci sono ragioni importanti per migliorarli ulteriormente, e i cristalli temporali potrebbero aiutare, come vedremo più avanti.

Alcuni sistemi del mondo reale che ci sono familiari costituiscono anche modelli di cristalli spazio-temporali di dimensioni superiori. Per esempio il modello mostrato qui sotto può rappresentare un'onda sonora piana, in cui l'altezza della superficie indica la compressione in funzione della posizione e del tempo. In natura è forse difficile trovare modelli di cristalli spazio-temporali più elaborati, tuttavia potrebbero essere obiettivi interessanti per artisti e ingegneri: immaginiamo un'Alhambra dinamica alla massima potenza.

Questi tipi di cristalli spazio-temporali, però, si limitano a riconfezionare fenomeni noti sotto un'etichetta diversa. Per spostarci in un territorio fisico veramente nuovo dobbiamo considerare la seconda domanda di Shapere, e per farlo dobbiamo mettere in campo l'idea di rottura spontanea della simmetria.

Rottura spontanea della simmetria

Quando un liquido o un gas si raffredda formando un cristallo, accade qualcosa di notevole a un livello fondamentale: la soluzione emergente delle leggi della fisica – il cristallo – mostra meno simmetria delle leggi stesse. Poiché questa riduzione della simmetria è provocata solo da una diminuzione della temperatura, senza alcuno speciale intervento esterno, possiamo dire che formando un cristallo il materiale rompe «spontaneamente» la simmetria per traslazioni spaziali.

Una caratteristica importante della cristallizzazione è un netto cambiamento del comportamento del sistema o, in linguaggio tecnico, una transizione di fase. Al di sopra di una certa temperatura critica (che dipende dalla composizione chimica del sistema e dalla pressione ambiente), abbiamo un liquido, mentre al di sotto abbiamo un cristallo: oggetti con proprietà ben diverse. La transizione avviene in modo prevedibile, ed è accompagnata dall'emissione di energia (sotto forma di calore). Il fatto che un piccolo cambiamento delle condizioni ambientali faccia riorganizzare una sostanza fino a farne un materiale qualitativamente distinto non è meno notevole per il solo fatto di essere, nel caso dell'acqua e del ghiaccio, molto familiare.

La rigidità dei cristalli è un'altra proprietà emergente che li distingue da liquidi e gas. Da un punto di vista microscopico, la rigidità emerge perché la struttura organizzata degli atomi in un cristallo persiste su lunghe distanze e il cristallo resiste a quello che potrebbe distruggere questa struttura.

Le tre caratteristiche della cristallizzazione che abbiamo appena visto – simmetria ridotta, netta transizione di fase e rigidità – sono collegate in modo profondo. Il principio alla base di tutte e tre è che gli atomi «vogliono» formare strutture favorevoli dal punto di vista energetico. In condizioni diverse (per esempio, pressioni e temperature differenti) possono prevalere scelte strutturali diverse, cioè, in termini tecnici, fasi diverse. Quando le condizioni cambiano, vediamo spesso transizioni di fase nette, e poiché la formazione di una struttura richiede un'azione collettiva da parte degli atomi, la scelta vincente verrà applicata a tutto il materiale, che tornerà allo stato precedente se il modello scelto viene disturbato.

Poiché la rottura spontanea della simmetria mette insieme un così bel pacchetto di idee e di conseguenze importanti, ho pensato che fosse importante esplorare la possibilità che τ potesse rompersi spontaneamente. Mentre mettevo per iscritto questa idea, la spiegavo a mia moglie, Betsy Devine: «È come un cristallo, ma nel tempo». Colpita dal mio entusiasmo, si incuriosì: «Come lo chiamerai?». «Rottura spontanea della simmetria per traslazioni temporali», risposi. «Assolutamente no», ribatté lei. «Chiamalo «cristalli temporali»». E così ho fatto. Nel 2012 ho pubblicato due articoli, di cui uno insieme a Shapere, in cui ho introdotto questo concetto. Un cristallo temporale, quindi, è un sistema in cui τ si rompe spontaneamente.

Ci si potrebbe chiedere perché ci sia voluto così tanto tempo affinché il concetto di τ e quello di rottura spontanea della simmetria convergessero, dato che separatamente sono ben compresi da molto tempo. È perché τ differisce dalle altre simmetrie in un modo cruciale che rende molto più sottile la questione della sua possibile rottura spontanea. La differenza emerge a causa di un profondo teorema dimostrato dalla matematica Emmy Noether nel 1915. Il teorema di Noether stabilisce un collegamento tra principî di simmetria e leggi di conservazione: mostra che per ogni forma di simmetria esiste una grandezza fisica corrispondente che viene conservata. Nel contesto di cui stiamo parlando qui, il teorema di Noether afferma che τ è sostanzialmente equivalente alla conservazione dell'energia. Viceversa, quando un sistema infrange τ, l'energia non si conserva e cessa di essere una caratteristica utile di quel sistema. (Più precisamente: senza τ, non è più possibile trovare una grandezza analoga all'energia, indipendente dal tempo, sommando contributi dalle varie parti del sistema.)

La spiegazione abituale del perché si verifica una rottura spontanea della simmetria è che può essere favorevole dal punto di vista energetico. Se lo stato con l'energia più bassa rompe la simmetria spaziale e l'energia del sistema si conserva, allora lo stato di simmetria rotta, una volta avviato, durerà nel tempo. È così, per esempio, che viene spiegata la normale cristallizzazione.

Ma questa spiegazione basata sull'energia non funziona per la rottura di τ, perché quest'ultima elimina proprio la possibilità di misurare un'energia. Questa apparente difficoltà ha posto la possibilità di una rottura spontanea di τ, e il concetto associato dei cristalli temporali, al di là dell'orizzonte concettuale della maggior parte dei fisici.

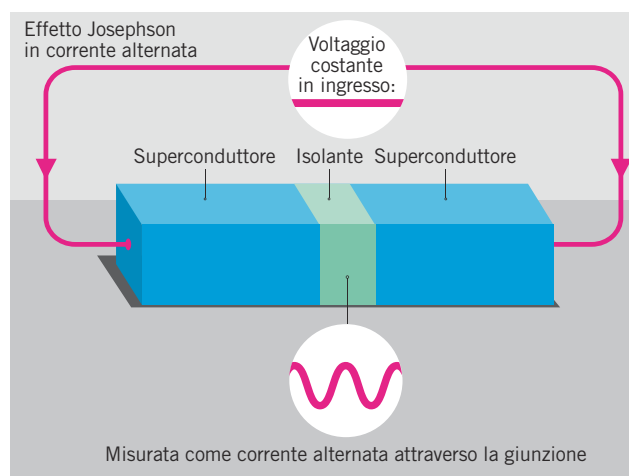
C'è però una via più generale alla rottura spontanea della simmetria, che si applica anche alla rottura di τ. Invece di riorganiz-

zarsi spontaneamente in uno stato a energia inferiore, un materiale potrebbe riorganizzarsi in uno stato più stabile per altri motivi. Per esempio, strutture ordinate che occupano ampie estensioni di spazio o di tempo e coinvolgono molte particelle sono difficili da sconvolgere perché la maggior parte delle forze distruttive agisce su scale piccole, locali. Un materiale potrebbe quindi raggiungere una maggiore stabilità assumendo una nuova struttura che si verifica su una scala più ampia rispetto allo stato precedente.

In definitiva, naturalmente, nessuno stato ordinario della materia può resistere a tutti i fenomeni che possono distruggerlo. Pensiamo per esempio ai diamanti. Una famosissima campagna pubblicitaria ha reso popolare il modo di dire «un diamante è per sempre». Ma nella giusta atmosfera e a una temperatura sufficientemente elevata anche un diamante brucerà, lasciando una misera cenere. La questione è che a temperatura e pressione atmosferica ordinarie i diamanti non sono uno stato stabile del carbonio. Si formano a pressioni molto più elevate e, una volta formati, sopravvivono a lungo a pressioni ordinarie, ma i fisici calcolano che, se aspettiamo abbastanza a lungo, qualsiasi diamante si trasformerà in grafite. Ancora meno probabile, ma pur sempre possibile, è che una fluttuazione quantistica possa trasformare un diamante in un minuscolo buco nero, come è anche possibile che il decadimento dei protoni lo corrompa lentamente. In pratica, quello che intendiamo per «stato della materia» (come il diamante) è un modo in cui una sostanza è organizzata, che ha un utile grado di stabilità contro una quantità significativa di variazioni esterne.

I cristalli ordinari sono disposizioni ordinate di oggetti nello spazio, mentre i cristalli spazio-temporali sono disposizioni ordinate di eventi nello spazio-tempo

Cristalli temporali vecchi e nuovi

L'effetto Josephson in corrente alternata (CA) è una delle gemme della fisica, e fornisce il prototipo di una grande famiglia di cristalli temporali. Si verifica quando applichiamo una tensione costante V (cioè una differenza di energia potenziale) attraverso una giunzione isolante che separa due materiali superconduttori (una cosiddetta giunzione Josephson, dal nome del fisico Brian Josephson). In questa situazione si osserva che attraverso la giunzione scorre una corrente alternata a frequenza $2eV/\hbar$, dove e è la carica dell'elettrone e $\hbar$ è la costante di Planck ridotta. Qui, sebbene la struttura fisica rimanga immutata (in altre parole, rispetta τ), il comportamento risultante varia nel tempo. La piena simmetria rispetto alle traslazioni temporali è stata ridotta alla simmetria rispetto a traslazioni temporali di multipli del periodo $\hbar/2eV$. L'effetto Josephson CA realizza quindi il concetto più elementare di un cristallo temporale. Per alcuni aspetti, tuttavia, non è l'ideale. Per mantenere la tensione è necessario in qualche modo chiudere il circuito e dotarlo di una batteria, ma i circuiti CA tendono a dissipare il calore, e le batterie si scaricano; inoltre le correnti oscillanti tendono a irradiare onde elettromagnetiche. Per tutti questi motivi, le giunzioni Josephson non sono stabili in modo ideale.

Grazie a vari miglioramenti (come circuiti completamente superconduttori, ottimi condensatori al posto delle normali batterie e involucri per intrappolare le radiazioni), è possibile ridurre in modo significativo il livello di questi effetti. Inoltre, altri sistemi in cui compaiono superfluidi oppure magneti al posto dei superconduttori mostrano effetti analoghi minimizzando questo tipo di problemi. In un lavoro recente, Nikolay Prokof'ev e Boris Svistunov hanno proposto esempi molto puliti con due superfluidi che si compenetrano.

Pensare esplicitamente alla rottura di τ ha concentrato l'attenzione su questi temi e ha portato alla scoperta di nuovi esempi e fruttuosi esperimenti. Tuttavia, poiché l'idea fisica centrale è già implicita nel lavoro di Josephson del 1962, possiamo chiamare tutti questi esempi «vecchi» cristalli temporali.

I «nuovi» cristalli temporali sono arrivati con il numero di «Nature» del 9 marzo 2017, che riportava in copertina splendidi (metaforicamente parlando) cristalli temporali e annunciava «Cristalli temporali: le prime osservazioni di un nuovo stato esotico della materia». Il numero conteneva due articoli indipendenti sulla loro scoperta. Uno descriveva l'esperimento in cui un gruppo diretto da Christopher Monroe dell'Università del Maryland a College Park aveva creato un cristallo temporale in un opportuno sistema formato da una catena di ioni di itterbio. Nell'altro esperimento il gruppo di Mikhail Lukin, della Harvard University, aveva realizzato un cristallo temporale in un sistema di molte migliaia di difetti, chiamati centri azoto-lacuna, all'interno di un diamante.

In entrambi i sistemi, la direzione dello spin degli atomi (gli ioni di itterbio o i difetti del diamante) cambia con regolarità, e gli atomi ritornano periodicamente alle configurazioni originali. Nell'esperimento di Monroe sono stati usati laser per invertire lo spin degli ioni e correlare gli spin in stati *entangled*. Il risultato è stato che gli spin degli ioni hanno iniziato a oscillare al doppio della frequenza degli impulsi laser. Nel progetto di Lukin sono stati usati impulsi di microonde per invertire gli spin dei difetti del diamante, ottenendo cristalli temporali con una frequenza pari a due o tre volte quella degli impulsi. In tutti questi esperimenti i materiali richiedevano una stimolazione esterna – impulsi laser oppure microonde – alla fine però manifestavano un periodo diverso da quello degli stimoli. In altre parole, hanno rotto spontaneamente la simmetria temporale.

Questi esperimenti hanno inaugurato una direzione nella fisica dei materiali, che è diventata un sottosettore a sé stante. Da allora sono entrati in scena altri materiali che seguono gli stessi principî

generali e che sono stati chiamati cristalli temporali di Floquet, e molti altri sono sotto esame.

I cristalli temporali di Floquet differiscono in modi importanti dai fenomeni imparentati scoperti in precedenza. Nel 1831, per esempio, Michael Faraday scoprì che quando scuoteva verticalmente una bacinella di mercurio con periodo *T*, il flusso risultante aveva spesso periodo 2*T*. La rottura della simmetria nel sistema di Faraday – e in molti altri sistemi studiati da allora a prima del 2017 – non permette però una netta separazione tra il materiale e la sollecitazione (in questo caso l'atto di scuoterlo) e non mostra i segni distintivi della rottura spontanea della simmetria. La sollecitazione non cessa mai di immettere nel materiale energia (o, più precisamente, entropia), che viene irradiata come calore.

Anzi, l'intero sistema costituito dal materiale e dalla sollecitazione – il cui comportamento, come abbiamo visto, non si può distinguere in modo netto – ha semplicemente meno simmetria rispetto alla sola sollecitazione. Nei sistemi del 2017, al contrario, dopo un breve periodo di assestamento il materiale finisce in uno stato stazionario in cui non si scambia energia o entropia con la sollecitazione. La differenza è sottile ma cruciale dal punto di vista fisico. I nuovi cristalli temporali di Floquet rappresentano fasi distinte della materia e mostrano i segni distintivi della rottura spontanea della simmetria, mentre gli esempi precedenti, sebbene estremamente interessanti di per sé, no.

Analogamente, la rotazione della Terra e la sua rivoluzione attorno al Sole non sono cristalli temporali in questo senso. Il loro notevole grado di stabilità è dovuto all'approssimativa conservazione dell'energia e del momento angolare, e queste grandezze non hanno i valori più bassi possibili, cosicché il ragionamento energetico precedente per la stabilità qui non vale; inoltre non appaiono regolarità a lungo termine. Per via dell'enorme valore dell'energia e del momento angolare in questi sistemi, per modificarli in modo significativo occorre un disturbo enorme, oppure piccoli disturbi che agiscono a lungo. Di fatto, effetti come le maree, l'influenza gravitazionale di altri pianeti e addirittura l'evoluzione del Sole alterano lievemente questi sistemi astronomici. Gli intervalli di tempo associati, come il «giorno» e l'«anno», sono notoriamente soggetti a occasionali correzioni.

I nuovi cristalli temporali, al contrario, mostrano una forte rigidità e stabilità, caratteristiche che offrono un modo per dividere il tempo in modo molto accurato, il che potrebbe essere alla base di nuovi orologi avanzati. I moderni orologi atomici sono una meraviglia di precisione, ma mancano della garanzia di stabilità a lungo termine dei cristalli temporali. Orologi più precisi e meno ingombranti basati su questi stati emergenti della materia potrebbero permettere misurazioni accuratissime di distanze e tempi, con applicazioni che vanno da un GPS migliorato a nuovi modi per rilevare cavità sotterranee e depositi di minerali, in base alla loro influenza sulla gravità, o addirittura onde gravitazionali. La Defence Advanced Research Projects Agency (DARPA) sta finanziando la ricerca sui cristalli temporali pensando a possibilità di questo tipo.

Il Tao di τ

L'insieme di idee e di esperimenti sui cristalli temporali e la rottura spontanea di τ costituisce ancora l'infanzia di questa direzione di ricerca. Ci sono molti problemi e fronti aperti su cui crescere. Un lavoro in corso punta a espandere il censimento dei cristalli temporali per includere esempi più grandi e più comodi da usare e una maggior varietà di strutture spazio-temporali, sia progettando nuovi materiali cristallini temporali sia scoprendoli in natura. I fisici sono anche interessati a studiare e comprendere le transizioni di fase che portano la materia dentro e fuori da questi stati.

Un altro obiettivo è esaminare in dettaglio le proprietà fisiche dei cristalli temporali (e dei cristalli spazio-temporali, in cui si rompono spontaneamente sia la simmetria spaziale sia τ). Qui l'esempio dei cristalli semiconduttori, accennato in precedenza, ci è di ispirazione. Quali scoperte emergeranno studiando come fanno i cristalli temporali a modificare il comportamento degli elettroni e della luce che si muovono al loro interno?

Essendoci aperti alla possibilità di stati della materia che coin-

UNA QUESTIONE DI RITMO

Come realizzare un cristallo temporale

Gli atomi nei normali cristalli ripetono una certa disposizione a distanze fissate; in modo analogo, i cristalli temporali sono stati della materia che si ripetono a periodi di tempo fissati. I primi nuovi materiali che rientrano in questa categoria sono stati scoperti nel 2017 da due gruppi di ricerca, uno guidato da Mikhail Lukin, della Harvard University, e l'altro da Christopher Monroe, dell'Università del Maryland a College Park.

Cristallo ordinario: ripetizione della posizione dell'oggetto

Distanza ⟶

Cristallo temporale: ripetizione di eventi

Tempo ⟶

L'esperimento di Lukin

Il gruppo di Lukin ha ottenuto un cristallo temporale manipolando gli spin degli atomi nei cosiddetti centri azoto-lacuna, che sono impurità in un reticolo di diamante. I ricercatori hanno esposto periodicamente il diamante a impulsi laser. Tra un impulso e l'altro gli spin continuavano a interagire tra loro. L'intero sistema ripeteva periodicamente la sua configurazione complessiva, ma non con lo stesso periodo degli impulsi a microonde, bensì con un suo periodo temporale la cui frequenza era inferiore a quella degli impulsi.

Tempo ⟶

Impulso di microonde

Interazioni

Impulso di microonde

Disposizione degli spin dei centri azoto-lacuna nel diamante

Disposizione alternativa degli spin

Eric Heller/SPL/AGF

Struttura al computer di un quasicristallo, cioè un cristallo che ha una struttura quasi periodica nello spazio. Con l'aggiunta della dimensione del tempo si possono ottenere i quasicristalli temporali.

volgono il tempo, possiamo considerare non solo i cristalli temporali ma anche i quasicristalli temporali (materiali molto ordinati ma che sono privi di schemi ripetitivi), i liquidi temporali (materiali in cui la densità degli eventi è costante nel tempo ma il periodo no) e i vetri temporali (che hanno una struttura che sembra perfettamente rigida ma in realtà mostra piccole deviazioni). I ricercatori stanno esplorando attivamente queste e altre possibilità. Anzi, sono già state identificate alcune forme di quasicristalli temporali e una sorta di liquido temporale.

Finora abbiamo considerato fasi della materia che mettono in gioco τ. Permettetemi di concludere con due brevi commenti su τ nell'ambito della cosmologia e dei buchi neri.

Il modello dello stato stazionario dell'universo è stato un tentativo aprioristico di mantenere τ in cosmologia. In quel modello, popolare a metà del Novecento, è stato ipotizzato che lo stato, o l'aspetto, dell'universo a grande scala sia indipendente dal tempo; in altre parole, che rispetti una simmetria temporale. Sebbene l'universo sia in espansione, il modello dello stato stazionario ipotizza che la materia sia prodotta di continuo, il che permetterebbe alla densità media del cosmo di rimanere costante. Ma il modello dello stato stazionario non è sopravvissuto alla prova del tempo. Gli astronomi hanno invece accumulato prove schiaccianti che 13,7 miliardi fa, subito dopo il big bang, l'universo fosse un posto molto diverso, nonostante valessero le stesse leggi fisiche. Da questo punto di vista, τ è (forse spontaneamente) rotta dall'universo nel suo insieme. Alcuni cosmologi hanno anche ipotizzato che il nostro sia un universo ciclico o che l'universo abbia attraversato una fase di rapida oscillazione. Queste congetture – che, a oggi, rimangono tali – ci avvicinano all'ambito di idee riguardanti i cristalli temporali.

Infine le equazioni della relatività generale, che costituiscono la migliore descrizione di quello che sappiamo attualmente della struttura dello spazio-tempo, si basano sull'idea che sia sempre possibile specificare la distanza tra due punti vicini. Sappiamo però che questa semplice idea viene meno in almeno due condizioni estreme: quando estrapoliamo la cosmologia del big bang fino ai suoi momenti iniziali e all'interno dei buchi neri. In altri ambiti della fisica il venir meno delle equazioni che descrivono il comportamento di un dato stato della materia è spesso un segnale che il sistema subirà una transizione di fase. È possibile che lo spazio-tempo stesso, in condizioni estreme di alta pressione, alta temperatura o rapido cambiamento, abbandoni τ?

In definitiva il concetto di cristalli temporali offre una possibilità di progresso sia teorico – per capire la cosmologia e i buchi neri da una diversa prospettiva – sia pratico. Le nuove forme di cristalli temporali che molto probabilmente appariranno nei prossimi anni ci porteranno verso orologi più perfetti e potrebbero rivelare altre proprietà utili. Ma in ogni caso sono interessanti e ci permettono di espandere le nostre idee su come può essere organizzata la materia. ■

PER APPROFONDIRE

Classical Time Crystals. Shapere A. e Wilczek F., in «Physical Review Letters», Vol. 109, n. 16, articolo n. 160402, ottobre 2012.

Quantum Time Crystals. Wilczek F., in «Physical Review Letters», Vol. 109, n. 16, articolo n. 160401, ottobre 2012.

Observation of a Discrete Time Crystal. Zhang J. e altri, in «Nature», Vol. 543, pp. 217-220, 9 marzo 2017.

Observation of Discrete Time-Crystalline Order in a Disordered Dipolar Many-Body System. Choi S. e altri, in «Nature», Vol. 543, pp. 221-225, 9 marzo 2017.

Time Crystals: A Review. Sacha K. e Zakrzewski J., in «Reports on Progress in Physics», Vol. 81, n. 1, articolo n. 016401, gennaio 2018.

Time Crystals in Periodically Driven Systems. Yao N.Y e Nayak C., in «Physics Today», Vol. 71, n. 9, pp. 40-47, settembre 2018.

I qualunquoni. Wilczek F., in «Le Scienze» n. 275, luglio 1991.

Lydia Denworth è *contributing editor* di «Scientific American», è autrice del libro *Friendship: The Evolution, Biology, and Extraordinary Power of Life's Fundamental Bond* (W. W. Norton).

STATISTICA

Un problema significativo

I metodi scientifici standard sono sotto attacco. Cambierà qualcosa?

di Lydia Denworth

Nel 1925 il genetista e statistico britannico Ronald Fisher pubblicò un testo intitolato (nella versione italiana del 1948) *Metodi statistici ad uso dei ricercatori*. Non certo un titolo da *best seller*; ma il libro ebbe un successo enorme, ed elevò l'autore al rango di padre della statistica moderna. Nel libro, Fisher affronta il problema di come i ricercatori possono applicare test statistici a dati numerici per trarre conclusioni su quello che hanno trovato e determinare se vale la pena proseguire.

Fisher fa riferimento a un test statistico che riassume la compatibilità dei dati con un certo modello proposto e fornisce un valore p. E suggerisce che i ricercatori potrebbero considerare il valore di 0,05 per p come una guida utile: «È conveniente prendere questo punto come limite nel giudicare se una deviazione deve essere considerata significativa o no».

Il suo consiglio è di inseguire risultati con valori di p al di sotto di quella soglia e non perdere tempo con quelli al di sopra di essa. Così è nata l'idea che un valore di p minore di 0,05 equivalga a quella che è nota come significatività statistica: una definizione matematica di risultato «significativo».

Quasi un secolo dopo, in molti campi dell'indagine scientifica un valore di p inferiore a 0,05 è considerato il parametro standard per determinare il merito di un esperimento. Apre le porte all'essenziale del mondo accademico – finanziamenti e pubblicazioni – e di conseguenza è alla base della maggior parte delle conclusioni scientifiche pubblicate. Eppure già lo stesso Fisher si rendeva conto che il concetto di significatività statistica e il valore di p su cui è basato hanno limiti considerevoli.

La maggior parte di questi limiti è stata riconosciuta già da decenni. «Fare eccessivo affidamento sui test di significatività – scriveva lo psicologo Paul Meehl nel 1978 – non è un buon modo di fare scienza». I valori di p sono regolarmente fraintesi, e la significatività statistica non è la stessa cosa della significatività pratica. In più, le decisioni metodologiche richieste in ogni studio danno allo sperimentatore la possibilità di spostare i valori di p, consciamente o meno, verso l'alto o verso il basso. «Come spesso si dice, con la statistica si può provare di tutto», dice lo statistico ed epidemiologo Sander Greenland, professore emerito all'Università della California a Los Angeles ed esponente di punta dei riformatori. Gli studi che puntano solo alla significatività statistica o a indicarne l'assenza portano regolarmente ad affermazioni inesatte: mostrano per vere cose che sono false e per false cose che sono vere. Quando Fisher è andato in pensione in Australia, gli è stato chiesto se era pentito di qualcosa della sua lunga carriera. Pare che abbia sbottato: «Aver parlato di 0,05».

IN BREVE

Da quasi un secolo, l'uso dei valori di p per determinare la significatività statistica dei risultati sperimentali ha contribuito a certezze illusorie e a crisi di riproducibilità in molti campi della scienza.

C'è una crescente determinazione per riformare l'analisi statistica, ma i ricercatori si chiedono se sia necessaria solo una messa a punto o una vera e propria revisione. Alcuni propongono di cambiare i metodi statistici, altri vorrebbero eliminare l'idea di un valore soglia per la «significatività» dei risultati.

In ultima analisi, il valore di p serve all'umano bisogno di certezze. Ma per scienziati e opinione pubblica forse è tempo di accettare e far proprio il disagio dell'incertezza.

Illustrazioni di Mark Allen Miller

Nell'ultimo decennio la discussione sulla significatività statistica si è riaccesa con particolare intensità. Una pubblicazione ha definito le fragili fondamenta dell'analisi statistica «il più sporco dei segreti della scienza». Un'altra ha parlato dei «tanti profondi difetti» dei test di significatività. L'economia sperimentale, la ricerca biomedica, e ancora di più la psicologia sono state travolte da una controversa crisi di replicabilità, in cui si è scoperto che una percentuale sostanziale dei risultati pubblicati non è riproducibile. Uno degli esempi più noti è l'idea della «postura autoritaria» – secondo cui un linguaggio del corpo particolarmente assertivo cambia non solo il vostro atteggiamento ma anche i vostri ormoni – basata su uno studio poi ripudiato da uno degli autori. Un articolo sull'economia del cambiamento climatico (scritto da uno scettico) «alla fine aveva quasi lo stesso numero di correzioni di errori e di dati, non scherzo, ma nessuna di quelle correzioni è stata sufficiente a far rivedere all'autore le proprie conclusioni», ha scritto Andrew Gelman, statistico della Columbia University sul suo blog, dove prende di mira i ricercatori che lavorano in modo approssimativo e non sono disposti a riconoscere i problemi dei loro studi. «Va bene anche fare un lavoro puramente teorico, ma allora non c'è bisogno di confonderci le idee con i dati», ha scritto.

Il concetto di significatività statistica, sebbene non sia l'unico fattore, è emerso come un'ovvia parte del problema. Negli ultimi tre anni centinaia di ricercatori hanno sollecitato una riforma urgente, scrivendo articoli su prestigiose riviste, oppure sostenendoli, sull'opportunità di ridefinire la significatività statistica o di abbandonarla del tutto. L'American Statistical Association (ASA), che nel 2016 ha pubblicato una dichiarazione forte quanto insolita, propone di «passare a un mondo oltre $p < 0{,}05$». Ronald Wasserstein, direttore esecutivo dell'ASA, la mette così: «La significatività statistica è un po' come il "mi piace" sui *social*. Indica solo un certo livello di interesse. Purtroppo però ormai la significatività statistica è diventata qualcos'altro. I ricercatori dicono: "Il mio 0,05 ce l'ho, sono a posto così". E la scienza si ferma».

Il punto è se cambierà qualcosa. «Nulla di tutto questo è nuovo. Quindi dobbiamo guardare con realismo alla possibilità che forse anche stavolta andrà come le altre», dice l'economista comportamentale Daniel Benjamin, della Southern California University, un'altra voce a favore delle riforme. Tuttavia, sebbene siano in disaccordo sui rimedi, colpisce vedere quanti ricercatori concordino sull'idea che, come ha scritto l'economista Stephen Ziliak, «l'attuale cultura in materia di test di significatività statistica, interpretazione e comunicazione dei risultati deve scomparire».

Il mondo così com'è

L'obiettivo della scienza è descrivere quello che è vero in natura. Gli scienziati usano modelli statistici per inferire questa verità: per determinare, per esempio, se un trattamento è più efficace di un altro oppure se due gruppi differiscono fra loro. Ogni modello statistico poggia su un insieme di ipotesi su come i dati sono raccolti e analizzati e su come i ricercatori scelgono di presentare i risultati.

Quasi sempre quei risultati sono centrati su un approccio statistico detto verifica della significatività dell'ipotesi nulla (o test di significatività rispetto all'ipotesi zero), che produce un valore di p. Questo tipo di test non punta alla verità per via diretta, ma guarda a essa in modo obliquo. Questo perché i test di significatività puntano solo a indicare se sia o meno il caso di perseguire una certa linea di ricerca. «Quando effettuiamo un esperimento vogliamo sapere quanto è probabile che la nostra ipotesi sia vera», dice

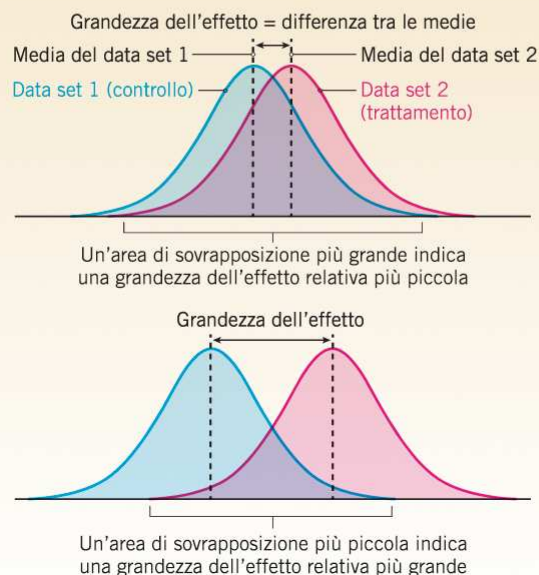
GLOSSARIO E SPIEGAZIONI

Significatività statistica

Immaginiamo di coltivare zucche in giardino. Se usassimo un fertilizzante, cambierebbero le loro dimensioni? Data la nostra lunga esperienza senza fertilizzanti sappiamo quanto varia il peso delle zucche, e che in media una zucca pesa 4,5 chilogrammi.
Decidiamo di raccogliere un campione di 25 zucche coltivate con il fertilizzante, e vediamo che in media pesano sei chilogrammi.
Come facciamo a decidere se la differenza di 1,5 chilogrammi rispetto alla norma di 4,5 chilogrammi, il valore atteso secondo l'ipotesi zero, è dovuta al caso oppure al fertilizzante?
La soluzione elaborata dallo statistico Ronald Fisher prevede un esperimento mentale. Si immagini di raccogliere un campione di 25 zucche alla volta un gran numero di volte. Ogni volta si otterrà un peso medio diverso a causa della variabilità casuale. Si costruisce allora un grafico della distribuzione di queste medie e si guarda la probabilità (valore di p) di ottenere i dati che abbiamo osservato se il fertilizzante fosse stato privo di effetti. Per convenzione, il valore $p = 0{,}05$ è diventato il valore soglia per identificare i valori significativi. In questo caso i risultati porteranno a concludere che il fertilizzante non ha avuto effetto.
Nelle illustrazioni e nei testi che le accompagnano si esaminano alcuni concetti che guidano l'esperimento mentale con cui si determina la significatività statistica.

GRANDEZZA DELL'EFFETTO

La grandezza dell'effetto per un trattamento è la differenza tra i risultati medi quando si applica o non si applica il trattamento. Il concetto può essere usato per confrontare le medie dei campioni o le medie «vere» di intere distribuzioni. La grandezza dell'effetto si può esprimere nelle stesse unità di misura dei risultati (come chilogrammi, o numero di zucche). Ma per molti risultati – come le risposte ad alcuni questionari psicologici – non ci sono unità naturali. In quel caso i ricercatori possono usare la grandezza relativa degli effetti. Un modo di misurare le grandezze relative degli effetti si basa sulla sovrapposizione tra le distribuzioni di controllo e trattamento.

Grafica di Amanda Montañez (*grafici*) e Heather Krause

VALORE DI *P*

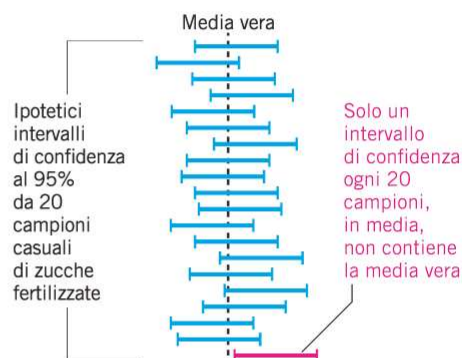
Per calcolare il valore di *p* bisogna confrontare l'effettivo peso medio di 6 chilogrammi osservato nel campione di 25 zucche con la distribuzione delle medie che otterremmo se estraessimo a caso numerosi nuovi campioni di 25 zucche cresciute in assenza di fertilizzante.

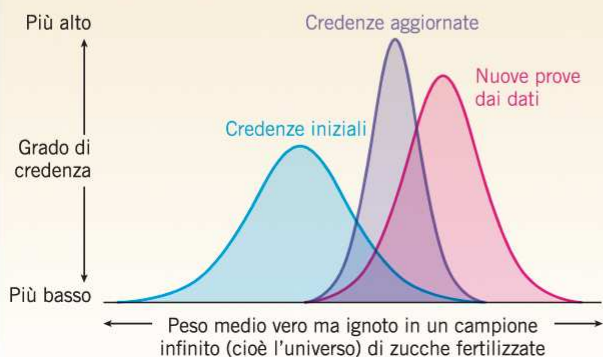
La curva a campana mostra la distribuzione delle medie dei pesi per campioni casuali di 25 zucche sotto l'ipotesi zero che il fertilizzante non abbia alcun effetto.

Il valore di *p* è la probabilità di ottenere un peso medio del campione casuale distante da 4,5 quanto la media effettivamente osservata, 6. Dato che 6 – 4,5 = 1,5, ci serve la probabilità di ottenere una media ≥ 6 o ≤ 3 (3 = 4,5 –1,5). In questo esempio, la probabilità è pari a 0,074, che è il valore osservato di *p* per il nostro campione. Dato che superiore a 0,05, questo risultato non sarebbe considerato significativo come prova che il fertilizzante fa una differenza.

L'esempio mostra un test «a due code», in cui il valore di *p* esprime la probabilità che il peso sia maggiore di 6 o minore di 3 (4,5 - 1,5 = 3). In certe circostanze un ricercatore può decidere di eseguire un test «a una coda». In questo caso, il valore di *p* sarebbe pari solo a 0,037, che, essendo inferiore a 0,05, è considerato significativo. Questo illustra uno dei modi in cui i ricercatori possono cambiare le intenzioni dichiarate all'inizio di uno studio per ottenere valori di *p* diversi partendo esattamente dagli stessi dati.

INTERVALLO DI CONFIDENZA

Dal campione di 25 zucche si può calcolare un intervallo di confidenza, cioè una stima del peso medio delle zucche fertilizzate. Calcolare l'intervallo di confidenza al 95 per cento implica calcoli inversi rispetto a quelli di *p* per trovare tutti i possibili valori del peso medio per cui $p \geq 0,05$. Con il campione di 25 zucche, l'intervallo di confidenza al 95 per cento va da 4,40 a 7,58. Il «vero» peso medio delle zucche fertilizzate potrebbe trovarsi in questo intervallo o no. Non possiamo esserne certi. Che cosa vuol dire «95 per cento»? Immaginiamo di avere più raccolti e prendere più volte campioni di 25 zucche. Ognuno darebbe un diverso intervallo di confidenza, con differenze casuali fra di essi. Nel lungo periodo, il 95 per cento di questi intervalli includerebbe il valore vero e il 5 per cento no. Ma il nostro particolare intervallo, ottenuto dal primo campione? Non sappiamo se faccia parte del 95 per cento di risultati che fanno centro o del 5 di quelli che mancano il bersaglio. È il processo a essere giusto il 95 per cento delle volte.

METODI BAYESIANI

Nell'approccio bayesiano all'inferenza statistica, lo stato di incertezza di una persona riguardante una quantità ignota è rappresentato da una distribuzione di probabilità. Si usa il teorema di Bayes per combinare le ipotesi iniziali – la loro distribuzione prima di vedere i dati – con le informazioni che si ricevono dai dati, il che produce una distribuzione matematicamente determinata delle credenze aggiornate. Le credenze aggiornate provenienti da uno studio diventano quelle di partenza per un nuovo studio, e così via. Un'importante area di discussione verte sul tentativo di trovare criteri «obiettivi» per le credenze iniziali. Lo scopo è trovare come costruire credenze iniziali, o distribuzioni a priori, che possano essere accettate dai ricercatori come ragionevoli.

SURPRISAL (SORPRESA)

Il valore di *p* comunica quanto sono sorprendenti i nostri dati se si suppone che il fertilizzante non abbia alcun effetto sulla crescita delle zucche. Alcuni ricercatori hanno suggerito che per molte persone i valori di *p* non comunicano in modo intuitivo quanto siano sorprendenti i dati osservati. Suggeriscono di usare invece una quantità matematica chiamata sorpresa, nota anche valore di *s*, che converte i valori di *p* in bit (come quelli dei computer). Questi valori possono essere interpretati mediante l'esempio del lancio di una moneta.

2 teste di fila = 2 bit di sorpresa = valore di $p = 1/2^2 = 0,25$

4 teste di fila = 4 bit di sorpresa = valore di $p = 1/2^4 = 0,0625$

5 teste di fila = 5 bit di sorpresa = valore di $p = 1/2^5 = 0,03215$

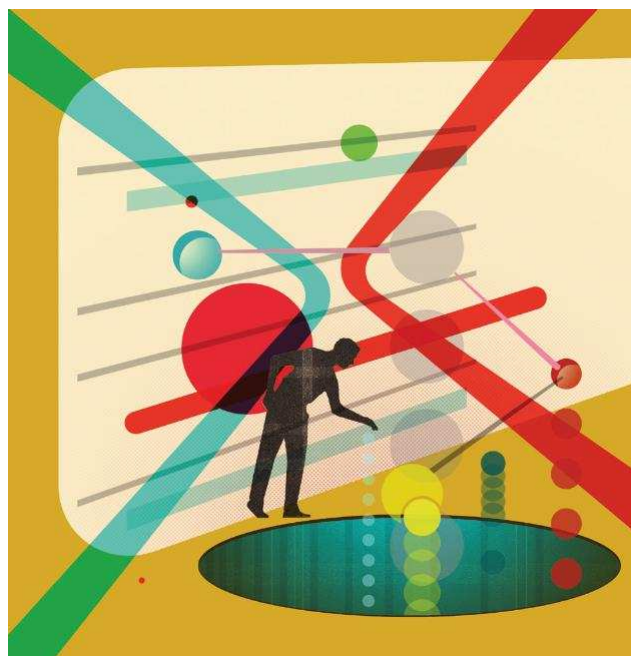
Il campione di 25 zucche dal peso medio di 6, con valore di *p* pari a 0,074, produce fra 3 e 4 bit di sorpresa; per essere esatti 3,76 bit di sorpresa, visto che $3,76 = -\log_2(0,074)$.

Benjamin. «I test di significatività però rispondono a una domanda alternativa e contorta, che è: se la mia ipotesi fosse falsa, quanto improbabili sarebbero i miei dati?».

A volte funziona. La ricerca del bosone di Higgs, una particella ipotizzata dai fisici negli anni sessanta, è un esempio estremo ma utile. L'ipotesi zero era che il bosone di Higgs non esistesse; quella alternativa che dovesse esistere. Vari gruppi di fisici hanno condotto esperimenti al Large Hadron Collider del CERN di Ginevra, ottenendo l'equivalente di un valore di p così piccolo da indicare che se il bosone di Higgs non esisteva, allora la probabilità di vedere quei risultati era 1 su 3,5 milioni. Questo ha reso indifendibile l'ipotesi zero. Poi gli scienziati hanno ricontrollato il tutto per essere certi che il risultato non fosse dovuto a qualche errore. «Il solo modo di accertarsi dell'importanza scientifica di quel risultato, e di assicurarsi il premio Nobel, era riferire di aver fatto i salti mortali per essere sicuri che nessuno dei problemi potenziali avrebbe potuto produrre quel valore bassissimo», dice Greenland. «Un valore così basso dice che il modello standard senza il bosone di Higgs non può essere corretto. Anzi, lo urla».

Ma la fisica permette un livello di precisione che altrove non è raggiungibile. Quando si effettuano test sulle persone, come in psicologia, non si arriverà mai a probabilità di 1 su 3 milioni. Un valore di p pari a 0,05 significa che la probabilità di rigettare ripetutamente un'ipotesi corretta con un gran numero di test è una su 20. Non indica, come invece spesso si crede, che la probabilità di errore del singolo test sia del 5 per cento. È per questo che molto tempo fa gli statistici hanno aggiunto gli «intervalli di confidenza», con cui dare un'idea dell'errore, o incertezza, nelle stime degli scienziati. Gli intervalli di confidenza sono matematicamente legati ai valori di p. Questi ultimi sono compresi tra 0 e 1. Se si sottrae 0,05 da 1 si ottiene 0,95, cioè il 95 per cento, l'intervallo di confidenza convenzionale. Ma un intervallo di confidenza è semplicemente un modo utile per riassumere i risultati dei test di un'ipotesi per molte dimensioni dell'effetto. «Non c'è nulla in essi che debba ispirare una particolare confidenza», dice Greenland. Eppure nel tempo sia i valori di p sia gli intervalli di confidenza hanno preso piede, offrendo un'illusione di certezza.

Il problema non sono necessariamente i valori di p, che anzi sono uno strumento utile quando sono usati nel contesto giusto, come sostengono di fare i redattori delle riviste scientifiche, i responsabili del finanziamento della ricerca e gli enti di controllo. La preoccupazione è che l'importanza della significatività statistica possa essere esagerata o eccessivamente enfatizzata, cosa particolarmente facile quando si lavora con campioni piccoli. È questo che ha portato all'attuale crisi di riproducibilità. Nel 2015 Brian Nosek, fra i fondatori del Center for Open Science ha guidato un progetto in cui sono stati ripetuti 100 importanti lavori di ricerca in psicologia sociale, trovando che solo il 36,1 per cento dei risultati poteva essere riprodotto senza ambiguità. Nel 2018 il Social Sciences Replication Project ha riferito sulla replicazione diretta di 21 studi sperimentali nelle scienze sociali pubblicati su «Nature» e su «Science» tra il 2010 e il 2015. Sono stati trovati effetti significativi nella stessa direzione dello studio originale in 13 lavori (62 per cento), e la dimensione (o grandezza) degli effetti nelle repliche era in media circa la metà che negli studi originali.

Anche la genetica ha conosciuto una crisi di riproducibilità, all'inizio degli anni duemila. Dopo molte discussioni, la soglia di significatività statistica in questo campo è stata spostata di molto. «Per le nuove scoperte di varianti genetiche legate a malattie o ad altri caratteri fenotipici, il valore standard di significatività è 5×10^{-8}, cioè

in sostanza 0,05 diviso per un milione», dice Benjamin, che ha lavorato anche in campo genetico. «L'attuale generazione di studi di genetica umana è considerata assai solida», sottolinea.

Lo stesso non si può dire della ricerca biomedica, dove il rischio tende piuttosto a essere quello dei falsi negativi, con ricercatori che parlano di non significatività statistica quando invece ci sono effetti: l'assenza di prove non è prova di assenza, come il fatto che una persona non abbia un anello al dito non prova che non sia sposata, ma solo che non porta la fede. Casi del genere a volte finiscono in tribunale, quando sono in gioco responsabilità aziendali e sicurezza dei consumatori.

Linee brillanti offuscate

Ma quanto sono gravi le difficoltà della scienza? Tra scienziati di molte discipline c'è ampio accordo sull'idea che l'interpretazione errata e l'enfasi eccessiva su valori di p e significatività statistica sono problemi reali, sebbene alcuni siano più moderati di altri nella diagnosi della gravità. «Preferisco vedere le cose a lungo termine», dice Blair T. Johnson, psicologo sociale dell'Università del Connecticut. «La scienza lo fa regolarmente. Il pendolo oscilla da un estremo all'altro, bisogna accettarlo». Stavolta, dice, di buono c'è il monito a essere modesti nelle nostre inferenze. «Come studiosi, senza umiltà non si va avanti».

Per andare avanti davvero, però, gli scienziati devono mettersi d'accordo su una soluzione. Questo è complicato quasi quanto la pratica stessa della statistica. «La paura è che eliminare questa prassi ormai consolidata di poter dire se le cose sono statisticamente significative o no introdurrebbe una sorta di anarchia nel processo», dice Wasserstein. Ma i suggerimenti abbondano, e includono cambiamenti nei metodi statistici, nel linguaggio con cui si descrivono quei metodi e nel modo in cui sono usate le analisi statistiche. Le idee più rilevanti sono state esposte in una serie di articoli iniziata con la dichiarazione dell'ASA del 2016, in cui più di una ventina di statistici si sono trovati d'accordo su alcuni principi per una riforma. A questo è seguito un numero speciale di una delle riviste dell'associazione, che conteneva 45 lavori su come superare la significatività statistica.

Nel 2018 un gruppo di 72 scienziati ha pubblicato su «Nature Human Behaviour» un commento dal titolo *Redefine Statistical Significance*, a favore di uno spostamento della soglia di significatività statistica da 0,05 a 0,005 per le rivendicazioni di nuove scoperte. (I risultati tra 0,05 e 0,005 dovrebbero essere definiti «indicativi».) Benjamin, autore principale del lavoro, la vede come una soluzione imperfetta a breve termine, ma che può essere implementata immediatamente. «La mia preoccupazione è che se non facciamo qualcosa subito perderemo lo slancio per realizzare cambiamenti più grandi che potrebbero veramente migliorare le cose, e perderemo un sacco di tempo a discutere della soluzione ideale. Nel frattempo, si produrrebbero tanti altri danni». In altre parole, non lasciamo che il meglio sia nemico del bene.

Altri dicono che ridefinire il livello di significatività statistica non serve perché il vero problema è l'esistenza stessa di una soglia. Nel marzo scorso Greenland, dell'Università della California a Los Angeles, Valentin Amrhein, zoologo dell'Università di Basilea, e Blakeley McShane, statistico ed esperto di marketing della Northwestern University, hanno pubblicato su «Nature» un commento in cui erano favorevoli all'abbandono del concetto di significatività statistica. La loro proposta è invece che i valori di *p* siano usati come variabile continua accanto ad altri elementi di prova, e che gli intervalli di confidenza siano ribattezzati «intervalli di compatibilità» per riflettere quello che effettivamente segnalano: la compatibilità con i dati, non la fiducia nei risultati. Hanno poi cercato adesioni su Twitter per le loro idee, e ottenuto la firma di circa 800 scienziati, fra i quali Benjamin.

La genetica ha conosciuto una crisi di riproducibilità risolta poi con una modifica della soglia di significatività

Certo, ci sono metodi statistici migliori, o almeno più diretti. Gelman, che spesso critica gli approcci statistici altrui, nel suo lavoro non usa affatto i test di significatività rispetto all'ipotesi zero. Preferisce la metodologia bayesiana, un approccio statistico più diretto in cui si parte da ipotesi iniziali, si aggiungono i nuovi dati e si aggiornano le ipotesi. Greenland sostiene l'adozione di una quantità matematica, detta *surprisal* (sopresa), che parte dai valori di *p* per calcolare i bit (nello stesso senso che in informatica) di informazione. Un valore di *p* pari a 0,05 equivale solo a 4,3 bit di informazioni a sfavore dell'ipotesi zero. «Equivale a ottenere testa quattro volte di fila lanciando una moneta», dice Greenland. «È una prova forte che il lancio della moneta era truccato? No. È un evento comune. Per questo 0,05 è uno standard debole». Se i ricercatori dovessero corredare i valori di *p* del relativo valore di sorpresa, sostiene, sarebbero tenuti a rispettare standard più rigorosi. Anche sottolineare di più la grandezza dell'effetto, che ci dice quanto sono forti le differenze trovate, sarebbe utile.

Una migliore istruzione sulla statistica sia per gli scienziati sia per il pubblico potrebbe iniziare dal rendere più accessibile il linguaggio di questa disciplina. Negli anni in cui Fisher aveva abbracciato il concetto di «significatività» la parola era meno impegnativa. «Voleva dire "significativo", non "importante"», dice Greenland. E non sorprende che un termine come «intervallo di confidenza» tenda a ispirare appunto un'eccessiva confidenza.

Accettare l'incertezza

La significatività statistica ha risposto all'umano bisogno di certezze. «Il peccato originale è che si vogliono certezze quando non è appropriato», dice Gelman. Forse è arrivato il momento di sopportare il disagio di non essere sicuri di come stanno le cose. Se ci riusciremo, la letteratura scientifica prenderà un aspetto diverso. Per riferire di un risultato importante «ci vuole un paragrafo, non una semplice frase», dice Wasserstein. E non dovrebbe bastare un unico studio. Alla fine, una teoria valida è quella che regge a decenni di verifiche.

Nella scienza che conta sta avvenendo qualche piccolo cambiamento. «Siamo d'accordo che a volte i valori di *p* sono usati in modo eccessivo, oppure sono male interpretati», dice Jennifer Zeis, portavoce del «New England Journal of Medicine». «Concludere che un trattamento è efficace rispetto a un certo esito per $p < 0,05$ e inefficace per $p > 0,05$ è una visione riduzionistica della medicina, e non sempre riflette la realtà». Zeis aggiunge anche che oggi i rapporti di ricerca includono meno valori di *p*, e un maggior numero di risultati è riferito con intervalli di confidenza e senza valori di *p*. Inoltre, il «New England Journal of Medicine» sta adottando i principi della *open science*, come pubblicare protocolli di ricerca più dettagliati e richiedere che gli autori seguano programmi di analisi statistica dei dati definiti in anticipo, segnalando i casi in cui se ne allontanano.

Alla Food and Drugs Administration non ci sono stati cambiamenti dei requisiti per gli studi clinici, secondo John Scott, direttore della divisione di biostatistica dell'agenzia statunitense. «Penso che sia molto improbabile che i valori di *p* spariscano a breve dai processi di sviluppo dei farmaci, tuttavia prevedo una crescente applicazione di metodi alternativi», dice. Per esempio, fra chi richiede finanziamenti per le proprie ricerche c'è stato un aumento dell'interesse verso l'uso dei metodi di inferenza bayesiani. «Il dibattito attuale riflette un generale aumento della consapevolezza di alcuni limiti delle tradizionali pratiche di inferenza statistica».

Johnson, che è il direttore entrante di «Psychological Bulletin», condivide le vedute dell'attuale direttore, ma dice: «Intendo imporre la conformità dei rapporti di ricerca a standard decisamente stringenti. In questo modo posso essere sicuro che tutti sappiano che cosa è successo e perché, e possano giudicare più facilmente se i metodi sono validi o hanno dei difetti». Johnson sottolinea inoltre l'importanza di meta-analisi e rassegne sistematiche ben eseguite come strumento per ridurre la dipendenza dai risultati di singoli studi.

La cosa decisiva è che un valore di *p* «non deve essere una chiave che apre o chiude le porte», dice McShane. «Cerchiamo di assumere un punto di vista più olistico, ricco di sfumature e valutazioni.» Come sostenevano anche alcuni contemporanei di Fisher. Nel 1928 altri due grandi della statistica, Jerzy Neyman ed Egon Pearson, scrivevano dell'analisi statistica: «I test in quanto tali non danno verdetti conclusivi, ma intesi come strumenti aiutano chi li adopera a prendere la decisione finale». ■

PER APPROFONDIRE

Evaluating the Replicability of Social Science Experiments in Nature and Science between 2010 and 2015. Camerer C.F. e altri, in «Nature Human Behaviour», Vol. 2, pp. 637-644, settembre 2018.

Moving to a World beyond «p< 0.05.» Wasserstein R.L., Schirm A.L. e Lazar N.A., in «American Statistician», Vol. 73, supplemento 1, pp. 1-19, 2019.

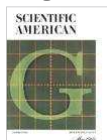
Rendere riproducibile la scienza. Palus S., in «Le Scienze» n. 604, dicembre 2018.

«Scientific American» compie 175 anni, e un'analisi dei colori delle sue copertine traccia un quadro delle tendenze dell'editoria

Il colore delle copertine

«Scientific American» ha iniziato come giornale in bianco e nero, di quattro pagine in formato lenzuolo, pubblicato settimanalmente.

Nel novembre 1921, la pubblicazione è diventata mensile. Qui, ogni barra orizzontale di ciascun mese rappresenta una singola uscita. Le piccole tessere di ogni barra rappresentano i cinque colori principali di ciascuna copertina, disposte da quello più usato (*sinistra*) a quello meno usato (*destra*).

A maggio 1948, un *restyling* ha stabilito l'iconica immagine quadrata della copertina, combinata con un logo sovrapposto e giustificato a sinistra, caratteristiche che sono rimaste, con alcune leggere modifiche, per quasi cinquant'anni.

Verso la fine degli anni novanta, il *desktop publishing* ha facilitato il processo di composizione delle copertine, portando a immagini suggestive integrate con caratteri di testo adattabili su misura.

Fin dal suo primo numero, pubblicato nel 1845, «Scientific American» ha seguito fedelmente le tecnologie con cui stampare la rivista. Alcune innovazioni sono state mostrate in copertina, come i caratteri digitali a maggio 1969 (*in basso*). Echi di altri avanzamenti sono visibili nell'analisi dei colori delle copertine (*sotto*). Dopo oltre 75 anni di pubblicazione settimanale – quasi sempre in bianco e nero, con occasionali macchie di colore – nel 1917 la rivista ha iniziato a usare la stampa *offset* litografica in rotativa per le copertine, che ha permesso l'attraente colorazione che nel 1921 ha segnato la transizione a mensile. Nel 1931, le copertine sono tornate a due colori, probabilmente per risparmiare soldi durante la grande depressione. Con la ripresa dell'economia, nel 1933 sono emerse varie tonalità sotto forma di fotografia in bianco e nero. Nel 1948 l'aspetto è cambiato a causa di una nuova proprietà e visione editoriale: tornano i colori, in un'immagine quadrata su uno sfondo a tinta unita che, nel 1952, diventa bianco e lo resterà per circa 43 anni. Con l'arrivo del *desktop publishing* alla fine del XX secolo, lo stile diventa più sperimentale: le immagini conquistano più spazio, inaugurando un periodo di illustrazioni realizzate digitalmente.

Jen Christiansen

Grafica di Nicholas Rougeux

giornalista informatico e studioso
della disinformazione nei media

Insetti marziani, entomologi alienati

Come dimostra la storia degli «insetti di Marte», neanche un professore emerito è esente dall'autoinganno

William Romoser, entomologo e professore emerito all'Ohio State University, ha affermato di avere prove dell'esistenza di insetti su Marte. Le ha presentate in una pubblicazione intitolata *Does Insect/Arthropod Biodiversity Extend Beyond Earth?* durante il recente simposio dell'Entomological Society of America. L'università ha pubblicato un comunicato stampa in proposito, con un virgolettato inequivocabile attribuito a Romoser: «C'è stata e c'è tuttora vita su Marte».

La notizia è stata comprensibilmente ripresa con interesse dalla stampa mondiale, ma l'università ha poi rimosso il comunicato, dichiarando che Romoser non desidera più dialogare con i media su questa ricerca. Inoltre l'entomologo ha reso privato il proprio sito.

Forme familiari

Questo repentino cambiamento di rotta è dovuto al fatto che i media hanno notato ben presto la limitatezza delle prove portate dall'entomologo per parlare di insetti marziani, di loro comportamenti in volo, di nidificazione in caverne e in «strutture specializzate» e di possibile «predazione» da parte di creature simili a rettili: una serie di dettagli enormemente ingranditi e sgranati di fotografie provenienti dai veicoli robotici presenti su Marte.

In quei particolari confusi è possibile immaginare di riconoscere qualunque forma familiare grazie al fenomeno ben noto della pareidolia, e per un entomologo le forme degli insetti sono decisamente familiari. Per gli altri ricercatori che osservano da decenni le foto della superficie di Marte, invece, le sagome indistinte indicate da Romoser come insetti o rettili sono semplicemente rocce.

Può sembrare assurdo che una persona di scienza non conosca la pareidolia e non si chieda perché nessuno ha mai notato queste presunte creature: queste sono lacune tipiche degli ufologi troppo entusiasti, non di chi ha fatto della scienza una carriera pluridecennale come Romoser. Ma anche un professore emerito può innamorarsi di un'idea al punto di diventare cieco e difenderla oltre ogni logica.

Tutta colpa della NASA

Gli archivi di Internet permettono di scoprire che Romoser coltiva da tempo l'idea di aver scoperto la vita su Marte: ha già firmato diverse pubblicazioni, oggi rimosse, che parlano di presunti veicoli od organismi volanti sul Pianeta Rosso, da lui identificati nelle immagini delle sonde marziane. Nella pubblicazione che lo ha portato all'attenzione della stampa, l'entomologo afferma addirittura che «è probabile che almeno alcuni membri del personale NASA/JPL abbiano familiarità con le creature insettiformi e rettiliformi marziane». Secondo Romoser, insomma, la NASA è al corrente ma tace, e sarebbe questo il motivo per cui lui è il primo scienziato a parlarne.

Una ricerca approfondita negli archivi digitali delle pubblicazioni di Romoser fa emergere una nuova presentazione, pubblicata dall'entomologo poco dopo quella che ha attirato l'attenzione della stampa, in cui risponde alle critiche, nega che si tratti di pareidolia e afferma che la NASA sarebbe colpevole di «offuscamento» intenzionale delle immagini per non rendere evidente la presenza di queste creature marziane.

Vedere un professore emerito che fa proprie le tesi di complotto paranoiche più classiche dell'ufologia è sconcertante per l'opinione pubblica. Ma è proprio per gestire casi come questo che la scienza ha adottato meccanismi di compensazione interna come la trasparenza, il controllo incrociato e la revisione paritaria: servono a limitare gli errori individuali di metodo e di interpretazione e gli autoinganni causati da chi, molto umanamente, s'innamora della propria tesi. Il passo dalla pareidolia alla paranoia è breve e nessuno è immune dal compierlo.

di Beatrice Mautino

biotecnologa, giornalista e comunicatrice scientifica. Tra i suoi libri più recenti *Il trucco c'è e si vede* (Chiarelettere, 2018)

Microplastiche della discordia

L'Unione Europea vuole porre limiti al loro inquinamento, ma le aziende cosmetiche chiedono chiarezza

Con l'inizio del 2020 è entrato in vigore il divieto di «mettere in commercio prodotti cosmetici da risciacquo ad azione esfoliante o detergente contenenti microplastiche», inserito nella legge di bilancio 2018 come ultimo atto del governo Gentiloni. Che cosa cambierà all'atto pratico? Purtroppo poco.

Quello delle microplastiche è un problema enorme per l'ambiente, soprattutto per quello acquatico, e benché non vi siano ancora dati sufficienti per capire quali possano essere le conseguenze per la nostra salute, secondo l'Organizzazione mondiale della Sanità bisogna muoversi in fretta.

Verso una definizione condivisa?

Nell'Unione Europea le aziende stanno operando una transizione volontaria verso l'abbandono di questi materiali. Nell'ottobre 2015, Cosmetics Europe, l'associazione europea di categoria delle aziende cosmetiche, ha raccomandato ai suoi membri di interrompere l'uso di microsfere nei prodotti da risciacquo entro il 2020. L'anno successivo, nel tentativo di monitorare la situazione, ha condotto un sondaggio fra le aziende da cui è emersa una riduzione dell'82 per cento dell'uso di microsfere di plastica rispetto al quantitativo utilizzato nel 2012. Due anni dopo, nel 2018, la situazione è ulteriormente migliorata arrivando a una riduzione del 97,6 per cento.

Alcuni Stati membri si sono mossi autonomamente emanando direttive e divieti, e fra questi c'è l'Italia con il divieto appena entrato in vigore, ma si tratta di azioni che potremmo definire «cosmetiche» per due motivi.

Il primo è che arrivano dopo l'abbandono volontario pressoché totale di questi ingredienti nei prodotti destinati a essere smaltiti nello scarico. Il secondo motivo è quello più importante e riguarda una proposta di restrizioni dell'Agenzia europea per le sostanze chimiche (ECHA) coinvolta dalla Commissione Europea per valutare i dati scientifici sulle microplastiche primarie, cioè quelle create appositamente, come le microsfere, mentre non interviene su quelle secondarie, che si formano dalla degradazione di materiale plastico più grande, come bottiglie, pneumatici o dal lavaggio dei vestiti in lavatrice. L'agenzia dovrà inoltre dare una definizione condivisa di che cosa si intende per microplastica e capire come procedere per ridurne l'impatto.

Queste azioni potrebbero rimettere tutto in discussione. L'ECHA propone la restrizione per «qualsiasi particella formata da polimeri, o contenente polimeri, solida o semisolida, avente una taglia inferiore ai 5 millimetri in almeno una dimensione». Sono esclusi dalla restrizione i polimeri di origine naturale e biodegradabili come la cellulosa.

Un problema complesso

Per quanto riguarda il settore cosmetico, questa definizione, se applicata nella sua versione più stringente, significherebbe una rivoluzione totale dei processi produttivi e una riduzione drastica degli ingredienti che possono essere usati.

Parliamo di sostanze dalle funzioni più disparate. Dagli emollienti che si dispongono sulla superficie della pelle rendendola più morbida, agli umettanti che ne aumentano l'idratazione fino agli antitraspiranti che riducono il sudore e a tutto il mondo dei pigmenti usati nel *make-up,* che spesso e volentieri sono rivestiti da polimeri.

Siamo di fronte a un problema complesso, «tra i più complessi che ci siamo trovati a dover affrontare» mi racconta un addetto ai lavori. Da un lato abbiamo la volontà politica dell'Unione Europea di porre dei limiti all'inquinamento da microplastiche a costo di inimicarsi le aziende. Dall'altro abbiamo le aziende che cercano di contenere i danni e chiedono maggiore chiarezza. I prossimi mesi saranno cruciali per capire chi avrà la meglio.

chimico, divulgatore, gastronomo. Autore di *Contro natura* (Rizzoli, 2015), *La Scienza della Carne* (Gribaudo, 2016)

Il liquore di mirto

Con tre milioni di bottiglie all'anno, è il prodotto tradizionale sardo più popolare

Il mirto (*Myrtus communis*) è un cespuglio sempreverde che cresce spontaneo lungo molte coste del Mediterraneo e che produce bacche di colore blu-nero particolarmente aromatiche. Il suo olio essenziale si usa per profumare saponi e cosmetici, ma l'uso più tipico delle sue bacche, a volte delle sue foglie, è la preparazione dell'omonimo liquore ottenuto tradizionalmente per macerazione in alcool etilico e successiva diluizione con uno sciroppo di zucchero. Negli ultimi decenni questo liquore, da prodotto di produzione familiare o di piccoli liquorifici, è diventato molto popolare in tutta Italia e persino all'estero. E oggi la produzione si attesta a più di tre milioni di bottiglie ogni anno, diventando il più popolare prodotto tradizionale sardo d'esportazione.

Indicazione geografica

Il colore, rosso violetto intenso, dipende dalle antocianine presenti nella buccia delle bacche, mentre il sapore un po' amaro e astringente – prima dell'aggiunta dello zucchero e della maturazione – è dovuto ai tannini della polpa. L'aroma invece dipende soprattutto da composti volatili detti terpeni. I terpeni sono una grande famiglia di molecole prodotte da moltissime piante e sono le componenti aromatiche principali dei loro oli essenziali e delle resine, conferendo a fiori e piante diverse un odore caratteristico. Sono terpeni, per esempio, il mentolo e il limonene. Nelle piante solitamente hanno la funzione di tenere lontani insetti e parassiti.

Il liquore mirto di Sardegna per potersi fregiare dell'indicazione geografica tipica deve avere un grado alcolico compreso tra 28 e 36 per cento in volume, contenere al massimo 270 grammi di zuccheri e una quantità minima di 150 grammi di bacche per litro di liquore. Le bacche, raccolte tra fine novembre e inizio gennaio, sono messe in infusione in una miscela di acqua e alcool etilico almeno al 40 per cento in volume per un periodo di almeno 15 giorni. La preparazione casalinga di solito prevede 40 giorni di infusione con alcool alimentare al 95 per cento in volume.

Come varia la composizione

Un gruppo di ricercatori del Dipartimento di tossicologia dell'Università di Cagliari ha pubblicato vari studi sul processo di produzione del mirto, allo scopo di migliorare la qualità del prodotto finale. Hanno preparato un'infusione seguendo una ricetta industriale e analizzato l'estratto alcolico ogni settimana per studiarne la variazione di composizione durante la macerazione.

Così hanno mostrato che le antocianine, responsabili del colore del liquore, sono in gran parte estratte nella prima settimana di macerazione, raggiungendo un massimo dopo 14 giorni per poi degradare. Gli oli essenziali volatili invece rimangono costanti durante tutta la macerazione. Questi oli si trovano principalmente nella buccia, quindi è presumibile che siano estratti del tutto nei primi giorni di macerazione alcolica. I terpeni più presenti sono α-pinene, limonene e 1,8-cineolo, chiamato anche eucaliptolo. È una molecola molto usata dall'industria alimentare per aromatizzare caramelle, ma anche dall'industria cosmetica e dell'igiene personale, per esempio in dentifrici e collutori. Come si intuisce dal nome è la molecola principale dell'olio essenziale di eucalipto e in misura minore anche in varie erbe aromatiche come alloro o rosmarino. L'α-pinene invece si trova principalmente negli oli essenziali delle conifere, soprattutto il pino.

In attesa di studi sulla composizione dell'estratto nella prima settimana di macerazione, io il mirto lo preparo lasciando 150 grammi di bacche in 190 grammi di alcool per sette giorni, diluendolo poi con 275 grammi di acqua deionizzata e 70 grammi di zucchero. Se lo trovate troppo forte, potete aumentare l'acqua.

Il colore intenso del liquore di mirto dipende dalle antocianine presenti nella buccia delle bacche, mentre il sapore amarognolo è dovuto ai tannini della loro polpa.

OcsanaDen/iStock

Le foto di una vacanza e la posa solenne di Gaetanagnesi in cima a una pila di scatole danno lo spunto per un problema fotografico

Hedy Lamarr in sedicesimo

«*Vigyázz, kész, rajt!* [*Pronti, partenza, via!*]»

«Bene, adesso ho visto (e sentito) anche le cose che voi umani non potete... eccetera eccetera.»

«E per forza, Alice – le risponde Piotr con un sorriso – siamo ormai nel 2020, e *Blade Runner* è cronologicamente situato nel novembre 2019, ricordi? Non è più fantascienza, al massimo storia alternativa.»

«E questo dovrebbe rallegrarmi? Voi due che parlate ungherese, la constatazione che sono ormai abbastanza vecchia da aver superato i tempi che nella mia verde infanzia consideravo lontanissimi: quale delle due informazioni dovrebbe provocarmi moti di gioia ed entusiasmo?»

«*Isten hozott, Fonat!* [Benvenuta, Treccia!] – fa da controcanto la voce baritonale di Rudy – sai che io e Doc abbiamo riguardato le foto delle vacanze? Questo mi ha fatto venire in mente un...»

«Non dirlo, Rudy. Almeno, non dirlo ancora, dammi un po' di tempo per riprendermi. Devo decantare un po' quest'inizio di giornata, d'accordo? Anche perché ho sempre considerato il poter guardare sui social network le foto delle altrui vacanze un grande balzo in avanti per l'umanità, ma non mi aspettavo, lo confesso, di scatenare quest'abominio linguistico con semplici foto di un viaggio in Ungheria.»

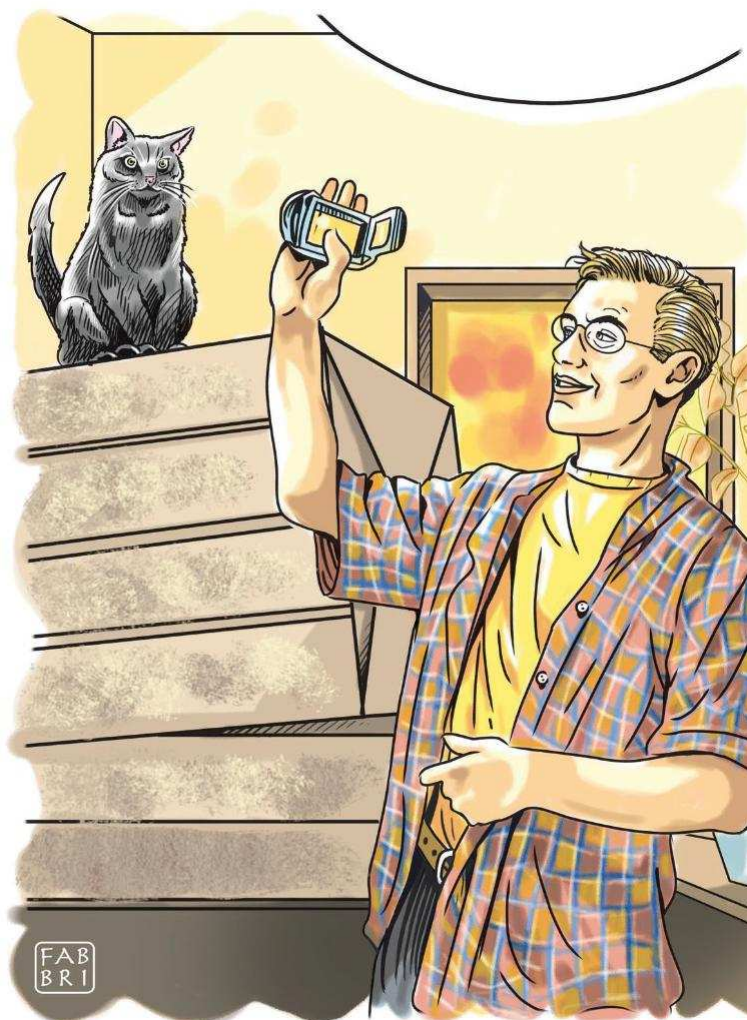
Pausa: molto breve invero, interrotta dalla stessa Alice, che riprende con un tono di voce un po' più acuto: «O meglio, forse dovevo aspettarmi questo e altro, visto il precario equilibrio di Gaetanagnesi su quella pila di scatole per scarpe, che assomiglia moltissimo ai miei incubi con la Torre di Babele. Che diavolo ci fa la micia lì sopra, si può sapere?»

«Di che ti preoccupi, Treccia? Vuoi insegnare ai gatti ad arrampicarsi? Guarda com'è solenne e fiera sul suo piedistallo: non vedi com'è orgogliosa del suo ruolo di divinità ammonitrice? Ha uno sguardo in grado di intimorire Bubasti e tutti gli altri dei egizi, figuriamoci che effetto farà sui poveri esseri umani che frequentano i social...».

In effetti, la micia aveva un'aria abbastanza regale, mentre si atteggiava in posa sopra una paio di scatole di cartone, con Piotr intento a inquadrarla dal basso con una fotocamera e Rudy impegnatissimo al computer, a compulsare immagini passate attraverso la rete di casa.

Prima che Alice potesse rinnovare una minima frazione delle sue perplessità, Piotr la previene: «Come sempre, Treccia, è tutta colpa di Rudy. La sua recente mania di diventare un *film maker* cresce a vista d'occhio e adesso, tra le altre cose, mi ha nominato responsabile di produzione e si è assunto il ruolo di regista, o presunto tale. Scommetto che da un momento all'altro se ne uscirà con una citazione di John Ford...»

«E ne avrei ben donde. John Martin Feeney, altrimenti noto

Illustrazione di Stefano Fabbri

come John Ford, era un accanito fumatore di pipa. Quindi, ti farò vincere la scommessa: "Spostate quelle 2000 mucche in favore di camera!"»

«Va bene. Hai vinto. Non volevo sentire il problema che certamente hai già partorito, ma se per evitarlo devo sentire blaterare in ugro-finnico, menzioni di divinità egiziane e citazioni di vecchi registi western, preferisco la sofferenza nota a questa tortura innovativa. Spara, su: che cosa c'è da calcolare? Mi va bene anche qualche obbrobrio probabilistico, ormai non ho più difese. »

«D'accordo, Treccia, la smettiamo: e per farci perdonare, niente probabilità. È che Rudy ha trovato le tue foto della *Szabadság-*

di Rodolfo Clerico,
Piero Fabbri e
Francesca Ortenzio

La soluzione del problema esposto in queste pagine sarà pubblicata in forma breve a febbraio e in forma estesa sul nostro sito: www.lescienze.it. Potete mandare le vostre risposte all'indirizzo e-mail: rudi@lescienze.it.

IL PROBLEMA DI DICEMBRE

Il mese scorso i nostri erano alle prese (come sempre per colpa della micia) con il calcolo relativo alla posizione ideale di un ascoltatore alle prese con un triplice sistema di altoparlanti, insomma con tre casse acustiche poste ai vertici di un triangolo equilatero. Nel contesto specifico, per «ideale» si intendeva la possibilità di sentire tutti e tre gli altoparlanti alla stessa potenza anche se uno (appunto per colpa della gatta) emetteva una potenza quadrupla rispetto agli altri due.

Essendo il suono dell'altoparlante inversamente proporzionale al quadrato della distanza tra l'ascoltatore e l'altoparlante stesso, il problema equivale alla determinazione di un punto a distanza doppia dall'altoparlante più potente rispetto alla distanza degli altri due. Vale ora ricordare che l'intersezione delle mediane (ovvero il baricentro) di un triangolo equilatero è posto a due terzi della distanza tra il vertice di origine di una mediana e il punto medio del lato opposto; inoltre, in un triangolo equilatero, ogni mediana è perpendicolare al lato su cui incide. Stante ciò, è facile verificare che la riflessione del centro del triangolo rispetto al lato che ha per vertici i due altoparlanti a basso volume finisce a distanza doppia dal vertice con l'altoparlante a potenza quadrupla rispetto alla distanza tra gli altri due vertici e il centro del triangolo. Altrettanto semplice è poi verificare che il punto così trovato è unico. Ciò basta a determinare che il punto di ascolto cercato non è all'interno del triangolo, come richiesto dal testo, ma al suo esterno.

szobor [Statua della Libertà] di Budapest, e ci ha immediatamente costruito un problema sopra. Per contrastarlo, ho provato a coinvolgere Gaetanagnesi, sperando che si rifiutasse… ma all'idea di essere fotografata in posa statuaria, quella vanitosa di gatta ha cominciato ad assumere arie solenni che nemmeno le dee feline dell'Antico Egitto erano in grado di immaginarsi.»

«Insomma, state provando a dare la colpa a me, o quantomeno alle mie foto. Ma l'ho già detto, va bene tutto. Due o tre scatole di scarpe in mezzo al salotto e una gatta dall'ego ipertrofizzato non saranno il guaio peggiore, specie se confrontate con certe altre vostre imprese. Dov'è nascosta la matematica, in tutto ciò?»

«Presto detto, Treccia. Due veloci colpi di *egér* [topo (mouse)], e…»

«Eh? Ah, va bene. Ma non ti era antipatico?»

«Quanto a te, il calcolo delle probabilità. Ma visto che ho trovato una soluzione molto bella, farò volentieri un'eccezione. Tutto nasce da questa tua foto dove, contravvenendo (giustamente, in questo caso) alla regola dei terzi, hai fotografato la statua a centro immagine, cercando di far risaltare la statua il più possibile.»

«Ecco. Immagino che adesso dovrei chiederti lumi su questa benedetta regola dei terzi, così come avrei dovuto chiedertene su Sekhmet oppure come-cavolo-si-chiamava quella divinità felina egizia, oppure su John Ford, o ancora su un'altra mezza dozzina di cose…»

«Ma no, non serve per il problema – interviene Piotr – certo, se muori dalla curiosità, posso spiegarti bene come i fotografi abbiano sempre fatto loro una regola che seguivano già i pittori, dividendo idealmente le due dimensioni dell'immagine da riprodurre in terzi, appunto, e generando così nove regioni della tela/foto, e asserendo che il miglior effetto estetico si ha quando il soggetto è posto…»

«Piantala, Doc. Hai detto che non serve per il problema, quindi posso farne a meno, per ora. Torniamo appunto al problema, e ditemi in che cosa consiste.»

«Esattamente nella statua. Supponi la statua sia alta h metri, posta su un piedestallo alto p metri e che i tuoi occhi siano a un'altezza di e metri da terra: se cammini verso la statua scattando continuamente foto, a quale distanza la statua apparirà più grande?»

«Beh, nel punto più vicino… O no? Direi di no, dal disordine che avete combinato.»

«Esatto Treccia, è per questo che Rudy si è imposto alla moviola e io passo il tempo a fare il fotografo di sedicenti divinità egizie; ha definito come "più grande" l'immagine in cui la statua sottende il massimo angolo. E io ho deciso di costruire un piccolo *kísérlet* [esperimento] in merito…»

«*Elég!* [Basta!] Mettete in ordine, che al problema ci penso io, se questa Hedy Lamarr in sedicesimo smette di assumere l'aria da star. Ma credo possano bastare una decina di crocchette, per far star buona lei...»

Le vie della rinascita di un paese

Dopo fortune e collassi, Jared Diamond affronta la resilienza delle società

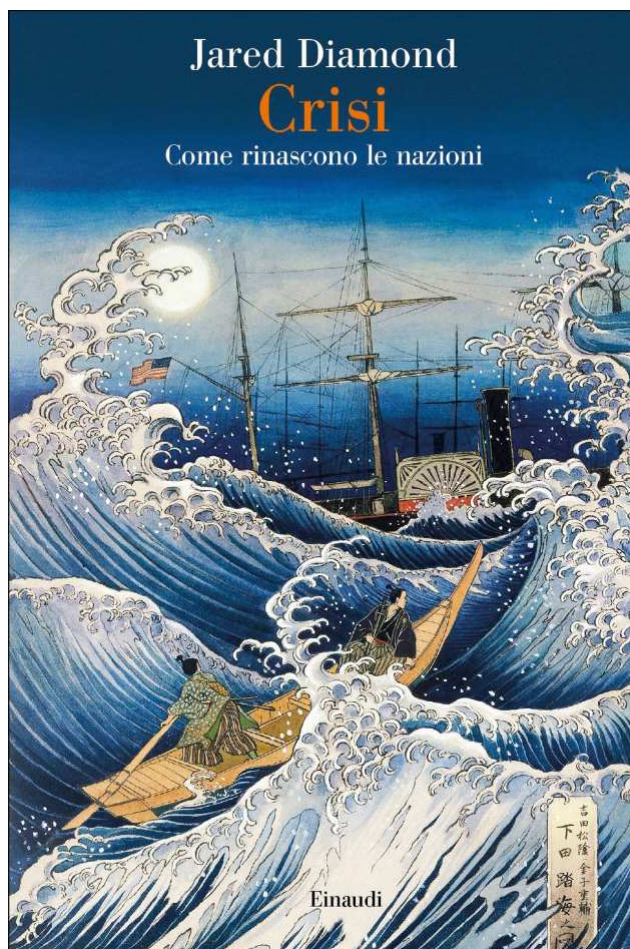
Crisi
di Jared Diamond
Einaudi, Torino, 2019, pp. 488 (euro 30,00)

Nel best seller che gli valse il premio Pulitzer, *Armi, acciaio e malattie*, Jared Diamond, professore di geografia all'Università della California a Los Angeles, interpretava la nascita e le fortune delle civiltà in base ai contesti geografici in cui si sviluppano. In *Collasso* esaminava come mai alcune arrivano a crollare. In *Crisi*, completando una sorta di trilogia, racconta come invece altre società, minacciate da una grave crisi, hanno saputo trovare le strategie e le risorse per superarla.

Oltre che di geografia, Diamond si è occupato di linguistica, antropologia, fisiologia, biologia evolutiva e parecchie altre cose ancora. Qui interpreta le crisi in società di epoche e continenti diversi dando fondo alle sue varie competenze, ma adottando di nuovo una chiave comune, che stavolta è la psicologia. Il modo in cui affrontiamo gli sconvolgimenti personali – è la sua tesi – ci dà indicazioni preziose su come risolvere le crisi delle società.

Per superare le crisi individuali è essenziale una trasformazione selettiva: bisogna cambiare quel che non va senza però stravolgere se stessi. Quindi si individuano gli aspetti della propria identità che funzionano e sono basilari, e quelli che creano problemi e vanno modificati, e si lavora a cambiare questi ultimi. Lo stesso vale per i paesi. Dall'approccio psicologico trae quindi un elenco di 12 fattori importanti nel risolvere le crisi personali e li trasla a quelle nazionali. Se per alcuni il parallelo è abbastanza naturale (bisogna anzitutto riconoscere di essere in crisi, e accettare la propria responsabilità nell'affrontarla), per altri, come riconosce egli stesso, è un po' forzato, o funge tutt'al più da metafora.

Per illustrare la sua tesi, Diamond presenta sette casi studio, di paesi molto diversi (Finlandia, Giappone, Cile, Indonesia, Germania, Australia e Stati Uniti) che hanno superato crisi passate o che le stanno vivendo. Racconta per esempio come il Giappone chiuso in se stesso di metà Ottocento, pressato dalla superiorità militare dell'Occidente ad aprirsi ai commerci, ma a rischio nel farlo di essere assimilato culturalmente, è riuscito a schiudere le porte e a incorporare molti elementi di modernità salvaguardando però il nucleo della propria cultura.

Diamond analizza come le vicende di ciascuna crisi rientrino nel suo schema esplicativo, con racconti godibili, perspicaci, ricchi di dettagli e informati dall'esperienza di prima mano dell'autore, che in molti di questi paesi ha vissuto, imparandone la lingua. A volte, com'è inevitabile se si vuole leggere con un'unica chiave una tale varietà di fenomeni, le interpretazioni sembrano un po' forzate per rientrare nello schema psicologico predefinito, sminuendo gli elementi che ne esulano. Nel Cile chiamato a superare la dittatura di Pinochet, per esempio, non sono enfatizzati il ruolo delle organizzazioni per i diritti umani, di fattori economici come il mercato del rame (voce cruciale dell'economia cilena, già decisiva per l'avvento al potere della dittatura), o di elementi geopolitici come la fine della guerra fredda. Gli scontri che hanno scosso il paese sudamericano negli ultimi mesi, poi, hanno mostrato come l'eredità sociale ed economica della dittatura non possa ancora dirsi davvero superata. A questo si aggiungono alcuni banali errori fattuali, come l'anno del voto sulla Brexit (che hanno indotto Anand Giridharadas, giornalista del «New York Times», a prendere questo testo a esempio della necessità di sottoporre anche i libri a un *fact-checking* professionale).

Fatta la tara di tutto ciò, *Crisi* resta un libro ambizioso e affascinante, ricco di racconti interessanti e fluidi e di idee stimolanti, da non prendere per oro colato, ma come un'ampia panoramica di vicende storiche e sociali piena di stimoli su cui riflettere.

Giovanni Sabato

Con il naso all'insù in Antartide

L'avventura intellettuale e umana di un gruppo di scienziati

Tra la Trentatreesima Strada e Walnut Street, dove si trova il Dipartimento di fisica dell'Università della Pennsylvania a Philadelphia, è notte fonda: le luci sono spente, il silenzio profondo. Nella *high-bay*, il grande hangar dove si sta terminando di montare BLAST, l'esperimento che dovrebbe volare all'Antartide alla fine dell'anno attaccato a un pallone da stratosfera, c'è solo una persona. Sta per testare i nuovi protocolli di rete del telescopio che fino a quel momento non permettevano lo *streaming* dei dati ai due computer di bordo. Semplicemente, si intasava tutto senza che nessuno sapesse perché. Dal test che stava per eseguire, Federico Nati avrebbe capito se il viaggio verso la postazione di lancio antartica sarebbe stato ancora possibile o se bisognava rimandare, magari di un'intera stagione. Da quella notte dipendevano le sorti di anni di lavoro di tutto il gruppo.

È solo una delle scene del *memoir* di Nati, astrofisico italiano, che raccontano l'avventura intellettuale e umana di un gruppo di scienziati che cerca di portare in volo circolare sopra l'Antartide un ammasso di strumentazione di tre tonnellate appeso a un pallone gonfio di elio. BLAST, che aveva lo scopo di captare le onde infrarosse provenienti dalle nebulose di polvere interstellare, è il tipico esempio di esperimento che mette a dura prova le capacità tecniche e intellettuali della comunità scientifica: tecnologia all'avanguardia spesso costruita *ad hoc*, condizioni ambientali estreme come quelle antartiche, progetto complesso per la raccolta di dati non facili da catturare. I margini d'errore sono minimi.

Intrecciato al racconto scientifico c'è anche molto altro. Sono quegli elementi che non finiscono nei *paper* e nemmeno su Wikipedia. Ci sono la dimensione umana dell'astrofisica osservativa di oggi, praticata da uomini e donne che somigliano agli esploratori ottocenteschi: luoghi remoti da raggiungere con viaggi estenuanti, frustrazioni sempre dietro l'angolo, cambi di direzione dettati dall'esigenza del momento, necessità di improvvisare. Ne esce un ritratto della ricerca non banale, lontano dagli stereotipi ed estremamente intrigante.

Marco Boscolo

L'esperienza del cielo
di Federico Nati
La nave di Teseo, Milano, 2019,
pp. 200 (euro 17,00)

Vaccini in cerca di pace

Come ribaltare la narrativa polarizzante sulle vaccinazioni

Pochi farmaci hanno avuto un impatto così positivo sulla salute collettiva come i vaccini, a cui si deve una netta riduzione della mortalità infantile ma anche la scomparsa (o quasi) di alcune gravissime malattie. Eppure basta una rapida ricerca tra Internet e *social* per farsi un'idea di quanto una pratica medica che ci dovrebbe ispirare solo gratitudine sia oggetto, invece, di dubbi e paure intense. Il fenomeno non è certo un'esclusiva dell'Italia né dei nostri tempi, perché ha fatto la sua prima comparsa contemporaneamente ai vaccini, ma oggi ci si interroga sul ruolo che hanno i nuovi media, e in particolar modo i social, nella diffusione e amplificazione di questi timori. E insieme al proliferare delle pagine antivacciniste si può assistere anche a un fiorire di altre pagine che si prendono duramente gioco di ogni forma di esitazione o dubbio, puntando il dito contro categorie stereotipate, come quella della «mamma informata».

In questo libro Roberta Villa, giornalista scientifica di formazione medica e membro del Gruppo tecnico consultivo nazionale sulle vaccinazioni, si pone lo scopo di ribaltare questa narrativa assai polarizzante e, di conseguenza, sterile. Il «non» tra parentesi nel titolo è significativo: i dubbi dei genitori che si apprestano a far vaccinare i propri figli sono normali e giustificati. Metterli sotto accusa e stigmatizzarne il comportamento come se attentassero deliberatamente alla salute dei figli è inutile e crudele. Tacciarli di ignoranza non è corretto, visto che spesso si tratta di persone di cultura medio-alta e metterli in ridicolo non contribuisce a indurli a cambiare idea. Questo perché la paura è un meccanismo forte e selezionato dall'evoluzione per difenderci dai possibili pericoli nascosti in ciò che non conosciamo.

Come uscirne? L'autrice mette in luce l'importante ruolo di una comunicazione che si deve mantenere positiva, senza costruire muri o definire schieramenti contrapposti. Un ruolo fondamentale in questo senso deve essere rivestito da figure di riferimento come gli operatori sanitari, un importante ponte tra comunità scientifica e genitori.

Anna Rita Longo

Vaccini
di Roberta Villa
Il Pensiero Scientifico Editore,
Roma, 2019,
pp. 220, (euro 14,00)

Un intreccio di successo

Biologia e cultura per l'incredibile ascesa di *Homo sapiens*

«Noi *sapiens*» lo siamo diventati in milioni di anni, grazie a un circolo virtuoso in cui la postura eretta ha richiesto e permesso cambiamenti di strategie riproduttive e alimentari. Ci siamo quindi ritrovati con una statura sempre maggiore, un cranio più grande, e la possibilità di nutrirci in modo diverso. Il nostro cervello più grande e più complesso è diventato motore di cultura, e ha portato a legami familiari diversi, con un forte investimento parentale (pochi figli da accudire per lungo tempo), meccanismi comunicativi nuovi, e anche la capacità di usare l'ambiente in modo differente, attraverso le mani finalmente libere dai compiti di locomozione. È il grande racconto dell'evoluzione umana, condensato dall'affiatato duo Condemi-Savatier, paleoantropologa e giornalista rispettivamente, in brevi capitoli.

Si individuano così i passaggi fondamentali del lungo viaggio che dalle foreste africane ha condotto in tutto il mondo: bipedalismo, linguaggio, caccia e così via. Caratteristiche evolutesi prima in altre specie di *Homo* e poi conservate anche nei *sapiens*, ovviamente con differenze. I due autori per esempio rimarcano la vicinanza cognitiva tra *H. sapiens* e *H. neanderthalensis*, mentre una netta differenza tra queste due specie va rilevata nel modo di stare al mondo: inclini «a una certa stabilità e [...] in equilibrio con l'ambiente» le popolazioni neanderthaliane, mentre noi abbiamo preferito «un processo di crescita demografia ed economica», che ha per esempio causato numerose estinzioni di grandi specie e di altri *Homo* (neanderthaliani, denisoviani, il «piccolo popolo» indonesiano dell'isola di Flores).

L'incredibile crescita di *H. sapiens* sarebbe quindi dovuta non tanto al solo patrimonio genetico, quanto a un intreccio tra biologia e cultura. La biologia è maggiormente sfruttata grazie a condizioni socioculturali favorevoli all'allungamento del periodo di crescita del cervello e poi gruppi più grandi e complessi (con divisione dei compiti tra gli individui). Di fronte all'attuale crisi ambientale, quanti rimpianti per la scomparsa del saggio Neanderthal.

Mauro Capocci

Noi siamo Sapiens
di Silvana Condemi
e François Savater
Bollati Boringhieri, Torino, 2019,
pp. 144 (euro 18,00)

L'urlo delle foreste

Perché salvare i boschi è urgente per il nostro benessere

L'ecologia forestale dovrebbe inserire teorie e dati in una narrazione, perché solo con le storie ci sentiamo parte di un ingranaggio complesso che senza di noi non funzionerebbe con la stessa efficienza. Ne è convinto Giorgio Vacchiano, esperto di gestione e pianificazione forestale, nominato di recente da «Nature» tra gli 11 migliori scienziati emergenti. E in effetti ogni capitolo di questo suo primo saggio è un'avventura dove vita personale, metodo e risultati della ricerca, insieme alla curiosità e allo stupore dell'uomo, si intrecciano e armonizzano nell'incontro con un bosco. Da quelli delle Alpi ai parchi naturali della Tanzania, dalla foresta del vulcano Sant'Elena rinata subito dopo la devastante eruzione del 1980, ai cipressi del Golfo del Messico, che, spesso sommersi dall'acqua di uragani e tempeste tropicali sviluppano radici a periscopio per respirare.

Non solo le foreste hanno incredibili capacità di resistere ai disturbi naturali ma questi sono parte integrante degli ecosistemi che ospitano. Gli incendi per esempio sono occasione per arricchire la biodiversità locale, e, se controllato, il fuoco è un metodo efficace per evitare gli incendi più distruttivi.

E se i boschi garantiscono la sopravvivenza degli animali, è vero anche il contrario. Le foreste più fertili al mondo, nelle isole Haida Gwaii, per esempio sono nutrite dalle carcasse di salmone cacciati dagli orsi, e i pochi enormi alberi della savana crescono grazie ai grandi erbivori che tengono sotto scacco la concorrenza di erba e arbusti. Una reciprocità che riguarda anche gli esseri umani, fautori però della crisi climatica che mette a rischio i boschi. Perché seppur dotati di una notevole resilienza, sta accadendo qualcosa senza precedenti per estensione e rapidità di cambiamento. Allora salvare i boschi, con numerose tecniche di gestione che Vacchiano contribuisce a ideare e realizzare, è un'urgenza soprattutto per il nostro benessere, garantito dai tanti benefici offerti dai boschi: dall'assorbimento di CO_2 alla protezione da frane, valanghe e mareggiate. Tutto è connesso. E la resilienza del bosco è anche la nostra.

Giulia Alice Fornaro

La resilienza del bosco
di Giorgio Vacchiano
Mondadori, Milano, 2019,
pp. 204 (euro 18,00)

Troppo bella per essere vera

Principi estetici e filosofici rischiano di fuorviare la fisica

La fisica fondamentale ha smarrito la strada? «Se la natura non fosse bella, non varrebbe la pena conoscerla», diceva Henri Poincaré. Stretti tra il modello standard, che non fallisce alcuna conferma sperimentale, e fenomeni come la materia oscura, che continuano a sfuggire a ogni spiegazione, i fisici si sono rifugiati nell'eleganza matematica come unica via maestra. Inseguendo teorie sempre più inebrianti come la supersimmetria o le stringhe, ma sempre meno a contatto con la realtà. È la tesi provocatoria che Sabine Hossenfelder, fisica teorica tedesca, espone nel suo libro.
In una serie di interviste in punta di fioretto Hossenfelder sfida alcuni dei principali esponenti della fisica teorica contemporanea, da Steven Weinberg a Nima Arkani-Hamed, cercando di capire quali siano le ragioni scientifiche alla base delle loro linee di ricerca. Costringendoli ad ammettere spesso che sono innamorati di vaghi principi estetici e filosofici, all'apparenza promettenti ma che rischiano di rivelarsi false piste. Non a caso l'acceleratore LHC del CERN di Ginevra non ha trovato alcuna traccia delle nuove particelle che i fisici si aspettavano da queste teorie.
È successo altre volte: Keplero aveva cercato per anni di creare un elegantissimo modello del sistema solare basato sui solidi platonici, ma dovette arrendersi e anzi concludere che le orbite non erano cerchi perfetti ma «imperfette» ellissi. La realtà non si adatta sempre ai nostri canoni filosofici. Secondo Hossenfelder, il problema oggi è aggravato dalla struttura della ricerca accademica, per cui lavorare su teorie di moda e flessibili, che possono sempre essere adattate per giustificarne il fallimento, viene ricompensato mentre chi cerca approcci alternativi è penalizzato, specie a inizio carriera.
Che si sia o meno d'accordo, Hossenfelder, grazie anche a una scrittura lucida, ironica e brillante, non solo ci guida in un percorso originale nella fisica contemporanea ma ci costringe a ripensare i fondamenti filosofici e sociali della ricerca scientifica. Un punto di vista rinfrescante nel suo rigore critico, di cui c'è molto bisogno.

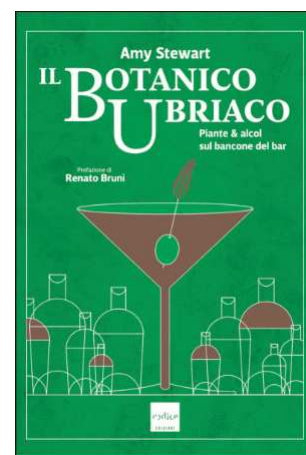
Massimo Sandal

Sedotti dalla matematica
di Sabine Hossenfelder
Raffaello Cortina, Milano, 2019, pp. 318 (euro 25,00)

Alcolici in prospettiva botanica

Le piante che finiscono in cocktail, vermouth e amari

Bourbon? *Zea Mays*. Assenzio? *Artemisia absinthium*. Birra? *Humulus lupulus*. Dietro ogni alcolico c'è almeno una pianta e Amy Stewart ce ne fa conoscere 160, dall'agave al peperoncino: piante aromatiche, frutti, foglie, radici, semi, che, schiacciati, distillati, infusi o spremuti finiscono nelle bottiglie e poi nel bicchiere. Per ognuna ne estrae almeno una storia intrigante, facendoci scoprire l'orticoltura che si nasconde nei *drink* e trasformando così un negozio di alcolici o il bancone di un bar nel giardino botanico più esotico del mondo.
Dal classico margarita al Blushing Mary, l'autrice ci offre una prospettiva botanica sull'alcool, dà qualche consiglio utile per coltivare qualche pianta da mettere nel bicchiere e illustra tante ricette per sperimentare. Ma ci mette in guardia dallo spingerci troppo oltre con il «fai da te», perché far finire in un distillatore o in una bottiglia l'erba aromatica sbagliata per estrarne i principi attivi potrebbe essere «l'ultimo atto di creatività». L'ortensia per esempio non è l'ingrediente più indicato per un *drink*, «visto che contiene un po' di cianuro».
In oltre 300 pagine dedicate alla botanica delle piante che finiscono in cocktail, vermouth e amari, è affascinante scoprire che «in tutto il mondo non esiste un albero, un arbusto o un fiore selvatico che non sia stato raccolto, fatto fermentare e imbottigliato». In sostanza, scrive l'autrice, visto l'apporto dei botanici nella creazione delle migliori bevande al mondo, è strano che ce ne sia uno sobrio. Anche se, a dirla tutta, tra spezie, *bitter*, *ginger ale*, acque toniche e infusi, i botanici possono farci scoprire anche bevande analcoliche.
L'edizione italiana del mondo botanico e alcolico di Stewart si apre con la bella prefazione di Renato Bruni che ricorda ai lettori e alle lettrici di maneggiare con cautela l'alcool, perché neppure la più piccola quantità è priva di effetti dannosi per il nostro organismo. Nessuna controindicazione, invece, all'assaporare avidamente il mix di scienza e cultura che risultano shakerati con eleganza in questa accattivante e piacevole guida alle piante usate per la produzione di alcolici.

Simona Regina

Il botanico ubriaco
di Amy Stewart
Codice Edizioni, Torino, 2019, pp. 400 (euro 31,00)

Prossimo numero

a febbraio

Fuga da un buco nero

di Steven B. Giddins

Le nuove frontiere delle osservazioni astronomiche suggeriscono la necessità di modificare l'immagine classica dei buchi neri verificando la validità di una diversa interpretazione che potrebbe risolvere il paradosso dell'informazione.

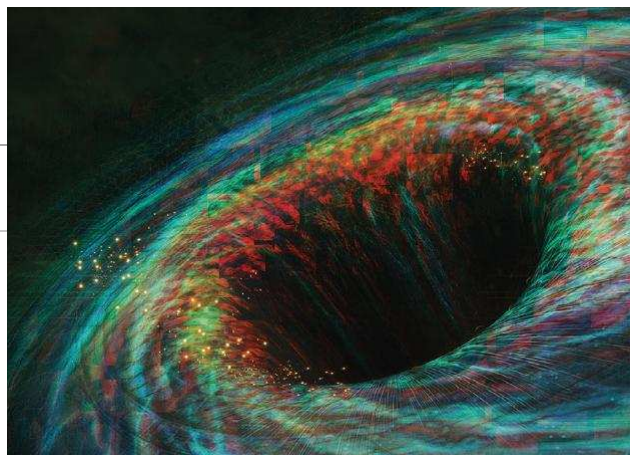
Misurare la disuguaglianza

di Bruce M. Boghosian

La disuguaglianza nella ricchezza sta aumentando a un ritmo allarmante in molte parti del mondo, anche in paesi diversi tra loro come la Russia, l'India e il Brasile. Un nuovo approccio sviluppato da fisici e matematici descrive con una precisione senza precedenti la distribuzione della ricchezza nelle economie moderne.

Dossier: combattere l'antibioticoresistenza

di Alessandro Cassini, Michele Cecchini, Roberta Villa e Charles Schmidt

I batteri resistenti agli antibiotici sono in continuo aumento in ogni parte del globo, comprese l'Europa e l'Italia. Per contrastare il fenomeno i ricercatori stanno sviluppando nuove soluzioni basate su virus e vaccini.

LE SCIENZE S.p.A.

Sede legale: Via Cristoforo Colombo 90, 00147 ROMA.

Redazione: tel. 06 49823181
Via Cristoforo Colombo 90, 00147 Roma
e-mail: redazione@lescienze.it
www.lescienze.it

Direttore responsabile
Marco Cattaneo

Redazione
Claudia Di Giorgio (*caporedattore*), Giovanna Salvini (*caposervizio grafico*), Andrea Mattone (*grafico*), Cinzia Sgheri, Giovanni Spataro

Collaborazione redazionale
Folco Claudi, Gianbruno Guerrerio
Segreteria di redazione:
Andrea Lignani Marchesani
Progetto grafico: Giovanna Salvini

Referente per la pubblicità
A. Manzoni & C. S.p.A.
agente Daria Orsi (tel. 02 57494475, 345 4415852)
e-mail dorsi@manzoni.it

Pubblicità:
A. Manzoni & C. S.p.A.
Via Nervesa 21, 20139, Milano,
telefono: (02) 574941

Stampa
Puntoweb, Via Variante di Cancelliera, snc, 00040 Ariccia (RM).

Consiglio di amministrazione
Corrado Corradi (presidente), Michael Keith Florek (vice presidente), Gabriele Acquistapace, Markus Bossle, Stefano Mignanego

Responsabile del trattamento dati
Il responsabile del trattamento dei dati raccolti in banche dati di uso redazionale è il direttore responsabile a cui è possibile rivolgersi scrivendo a privacy@lescienze.it per i diritti previsti dal Regolamento (UE) 2016/679 sulla protezione dei dati personali.

Registrazione del Tribunale di Milano n. 48/70 del 5 febbraio 1970.

Rivista mensile, pubblicata da Le Scienze S.p.A.
Printed in Italy - dicembre 2019

ISSN 2499-0590

SCIENTIFIC AMERICAN

Acting Editor in Chief
Curtis Brainard

President
Dean Sanderson

Executive Vice President
Michael Florek

Hanno collaborato a questo numero
Per le traduzioni: Silvia Baldi: *Obesità e cervello;* Eva Filoramo: *Ripristinare la biodiversità del riso*; Daniele Gewurz: *Cristalli nel tempo;* Lorenzo Lilli: *Mostri dei cieli mesozoici;* Alfredo Tutino: *Dieci tecnologie innovative per il 2020, Canzoni alate, Un problema significativo.*

ABBONAMENTI E ARRETRATI
GEDI Distribuzione S.p.A.

Per informazioni sulla sottoscrizione di abbonamenti e sulla richiesta di arretrati telefonare al numero 0864.256266 o scrivere a abbonamenti@gedidistribuzione.it o arretrati@gedidistribuzione.it
Fax 02.26681986.

Italia	
abb. annuale	€ 39,00
abb. biennale	€ 75,00
abb. triennale	€ 99,00
copia arretrata	€ 9,00
Estero	
abb. annuale Europa	€ 52,00
abb annuale Resto del Mondo	€ 79,00

Accertamento diffusione stampa certificato n. 8593 del 18/12/2018

Illustrazione Mondolithic Studios (*buco nero*); SPL/AGF (*piastra di Petri*)

le Scienze
edizione italiana di Scientific American